

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

На правах рукописи

ЛАЩЕНОВ МИХАИЛ БОРИСОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ САМОЗАПУСКА СИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЯХ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шевырёв Юрий Вадимович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.	11
1.1. Общие положения.....	11
1.2. Краткий обзор развития исследований режимов самозапуска электродвигателей промышленных установок.....	16
1.3. Особенности применения синхронных двигателей.....	22
1.4. Особенности работы защиты и автоматики подстанции в случае кратковременного перерыва питания.....	25
1.5. Особенности систем автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей.....	28
1.6. Теоретические исследования влияния кратковременного перерыва питания на работу синхронных двигателей.....	29
1.7. Особенности методики обоснования параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях.....	36
1.8. Выводы по первой главе и постановка задачи исследования.....	38
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ	40
2.1. Реализация модели синхронного двигателя.....	40
2.2. Реализация моделей источников питания, ЛЭП, трансформаторов.....	42
2.3. Реализация модели системы электроснабжения промышленного предприятия.....	44
2.4. Реализация моделей систем автоматических регуляторов возбуждения синхронных электродвигателей.....	45
2.4.1. Синхронный электродвигатель с обратной связью по току возбуждения.....	47
2.4.2. Синхронный электродвигатель с обратной связью по реактивной мощности.....	50

2.4.3. Синхронный электродвигатель с обратными связями по току возбуждения и реактивной мощности..... 52

2.4.4. Реализация асинхронного пуска синхронного электродвигателя..... 54

2.5. Выводы по второй главе 56

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ САМОЗАПУСКА СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СЛУЧАЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ПЕРЕРЫВА ПИТАНИЯ.....57

3.1. Математическая модель системы электроснабжения промышленного предприятия в случае кратковременного снижения напряжения..... 57

3.2. Моделирование кратковременного перерыва питания системы электроснабжения..... 57

3.2.1. Моделирование самозапуска синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 35 кВ..... 59

3.2.2. Зависимости самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания и напряжении внешнего электроснабжения 35 кВ..... 65

3.2.3. Моделирование самозапуска синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 110 кВ..... 69

3.2.4. Зависимости самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания и напряжении внешнего электроснабжения 110 кВ..... 75

3.3. Способ снижения тока статора двигателя в случае кратковременного перерыва питания..... 78

3.4. Способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей посредством форсировки возбуждения..... 79

3.5. Рекомендации по обеспечению самозапуска синхронных электродвигателей в случае кратковременного перерыва питания..... 81

3.6. Выводы по третьей главе..... 83

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ САМОЗАПУСКА СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ..... 85

4.1. Математическая модель системы электроснабжения промышленного предприятия при коротких замыканиях.....	85
4.2. Моделирование короткого замыкания.....	85
4.2.1. Моделирование коротких замыканий для синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 35 кВ.....	87
4.2.2. Зависимости самозапуска СД при коротких замыканиях и напряжении внешнего электроснабжения 35 кВ.....	95
4.2.3. Моделирование коротких замыканий для синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 110 кВ.....	99
4.2.4. Зависимости самозапуска СД при коротких замыканиях и напряжении внешнего электроснабжения 110 кВ.....	108
4.3. Способ снижения тока статора двигателя при коротком замыкании.....	111
4.4. Способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей посредством форсировки возбуждения.....	113
4.5. Рекомендации по обеспечению самозапуска синхронных электродвигателей при коротких замыканиях.....	114
4.6. Выводы по четвертой главе.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационной работы. В настоящее время на промышленных предприятиях в системах электроприводов компрессорных, вентиляторных, насосных и других установок широко применяются синхронные электродвигатели. В процессе эксплуатации синхронных двигателей возможны аварийные ситуации, возникающие в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в системе электроснабжения, которые влияют на устойчивость нормального режима работы и выпадению двигателей из синхронизма. В связи с этим незапланированное отключение синхронных двигателей может привести к материальному ущербу, риску для жизни и здоровья людей. Одним из эффективных путей решения обеспечения нормального режима работы электрооборудования на предприятиях при кратковременных перерывах питания или коротких замыканиях является применение самозапуска синхронных электродвигателей. Самозапуском называется процесс восстановления нормального режима работы двигателей без вмешательства персонала после кратковременного отключения или глубокого снижения питающего напряжения.

Согласно ПУЭ, самозапуск особенно важен для электроустановок 1-й категории. Примером таких электроприемников могут служить водоотливные установки, вентиляторные установки шахт, флотационные машины и т. д.

Отличительной особенностью самозапуска является то, что в связи с ростом мощностей применяемых синхронных двигателей, все больше внимания должно уделяться влиянию этих двигателей на питающую сеть в переходных режимах. Не учет этого влияния может привести к нарушению устойчивости узла нагрузки и возникновению аварийной ситуации.

Степень разработанности проблемы. Вопросам повышения устойчивости и исследованию самозапуска посвящено достаточно много работ. Среди них необходимо выделить работы отечественных ученых: Сыромятникова И. А., Барзама А. Б., Шапошникова К. Я., Дворак Н. М., Ершова М.С., Голоднова Ю. М., Михалева С. В., Жеребцова А. Л., Абрамовича Б.Н., Гончарова А.Ф. и др., и работы зарубежных авторов: Lewes M., Bednarek C. и др.

Выполненный анализ показал, что практически во всех работах для определения условий самозапуска синхронных двигателей используются допущения, которые не позволяют учесть все факторы, влияющие на протекание переходных процессов самозапуска синхронных электродвигателей. В то же время исследования переходных процессов в синхронном электроприводе методом имитационного моделирования позволяют проанализировать влияние на самозапуск таких значимых факторов как: структура и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, структура и параметры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей, одновременную работу нескольких синхронных электродвигателей различной мощности в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Вышеуказанные обстоятельства позволили сформулировать цель работы и поставить задачи научных исследований.

Целью работы является обоснование параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Идея работы заключается в том, что установление влияния на переходные процессы в синхронном электродвигателе его параметров, одновременной работы нескольких электродвигателей, автоматических регуляторов возбуждения, параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты позволяют обосновать параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя, учитывающие структуру и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, систему

автоматического регулирования возбуждения и одновременную работу нескольких электродвигателей.

2. Методом имитационного моделирования получить зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, характеризующие особенности самозапуска вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

3. Обосновать параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработаны компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронных электродвигателей, учитывающие электромагнитные процессы, автоматические регуляторы возбуждения, одновременную работу нескольких электродвигателей и время срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения.

2. Установлены зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

3. Обоснованы параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных режимах, отличающиеся учётом электромагнитных процессов в синхронном электродвигателе, автоматических регуляторов возбуждения, одновременной работы нескольких электродвигателей и времени срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения.

Теоретическая значимость работы:

- в исследовании переходных процессов самозапуска синхронных двигателей с учетом электромагнитных процессов при одновременной работе нескольких

электродвигателей, содержащих автоматические регуляторы возбуждения и времени срабатывания релейной защиты в системе электроснабжения.

- в обосновании рациональных параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Практическая значимость работы:

- в создании компьютерных моделей, позволяющих исследовать переходные процессы во время самозапуска синхронных электродвигателей и принимать обоснованные решения по его обеспечению на этапе проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;

- в разработке методики нахождения рациональных параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях.

Методы исследования. В процессе исследований использовались методы анализа электрических цепей, электрических машин, силовой полупроводниковой техники, теории автоматического регулирования, систем электроснабжения предприятий и имитационного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в сети электроснабжения, учитывающие электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, одновременную работу нескольких электродвигателей, содержащих автоматические регуляторы возбуждения, структуру и параметры системы электроснабжения, времена срабатывания релейной защиты.

2. Зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, позволяющие обосновать рациональные параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях в случае кратковременного перерыва питания.

3. Зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени устранения короткого замыкания, позволяющие обосновать рациональные параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях в случае коротких замыканий.

4. Способ управления током возбуждения синхронного электродвигателя во время самозапуска, позволяющий уменьшить пиковое значение тока статора и обеспечить самозапуск при увеличении времени срабатывания релейной защиты.

Степень достоверности результатов. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, подтверждаются: критическим анализом литературы, посвященной исследованию самозапуска синхронных двигателей; корректным применением теорий электрических цепей, электрических машин, силовой полупроводниковой техники, теории автоматического регулирования, систем электроснабжения; сходимостью результатов компьютерного моделирования с теоретическими расчётами аналогичных процессов в системах электроснабжения с синхронными двигателями (относительная погрешность не превышает 10%).

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2019–2022 гг.), заседаниях научного семинара кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ «МИСиС» (г. Москва, 2020–2022 гг.).

Реализация выводов и рекомендаций работы. Компьютерные модели, позволяющие исследовать переходные процессы самозапуска синхронного двигателя и методики рациональных параметров самозапуска в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания используются в ООО «Электротехническая промышленная компания» при разработке нового электрооборудования для горных предприятий.

Публикации. Результаты исследований, отражены в 4 публикациях, в том числе 2 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки

России, 1 работа опубликована в издании, индексируемом Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертационной работы состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и 1 приложения. Основная часть диссертационной работы содержит 55 рисунков и 23 таблицы. Общий работы изложен на 130 страницах.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Общие положения

В настоящее время на промышленных предприятиях в системах электроприводов широко применяются синхронные двигатели (СД). В процессе эксплуатации синхронных двигателей возможны аварийные ситуации, которые влияют на устойчивость нормального режима работы и выпадению двигателей из синхронизма. В связи с этим незапланированное отключение СД может привести к материальному ущербу, риску для жизни и здоровья людей.

Одним из эффективных путей решения обеспечения нормального режима работы электрооборудования на предприятиях при кратковременных перерывах питания или коротких замыканиях является применение самозапуска СД. Самозапуском называется процесс восстановления нормального режима работы двигателей без вмешательства персонала после кратковременного отключения или глубокого снижения питающего напряжения [1].

На рисунке 1.1 приведена типовая структурная схема системы электроснабжения (СЭС) промышленного предприятия, которая используется при исследовании переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя. Принято, что по обеспечению надёжности, её электроприёмники относятся к 1-й категории.

Согласно ПУЭ, электроприемники по обеспечению надёжности подразделяются на три категории:

1-я категория – электроприемники, нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни и здоровью людей, значительный ущерб производства в масштабах страны, повреждение оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение особо важных элементов коммунального хозяйства. Примером таких электроприемников могут служить водоотливные установки, вентиляторные установки шахт, флотационные машины и т. д.

2-я категория - электроприемники, перерыв в электроснабжении которых приводит к массовому недоотпуску продукции, длительным простоям рабочих механизмов и промышленного транспорта. Примером таких электроприемников могут служить скиповые подъемные установки шахт, измельчительные механизмы обогатительных фабрик и т. д.

3-я категория – все остальные электроприемники, не подходящие под определение 1-й и 2-й категорий: транспорт породы, механические мастерские и т. д [98].

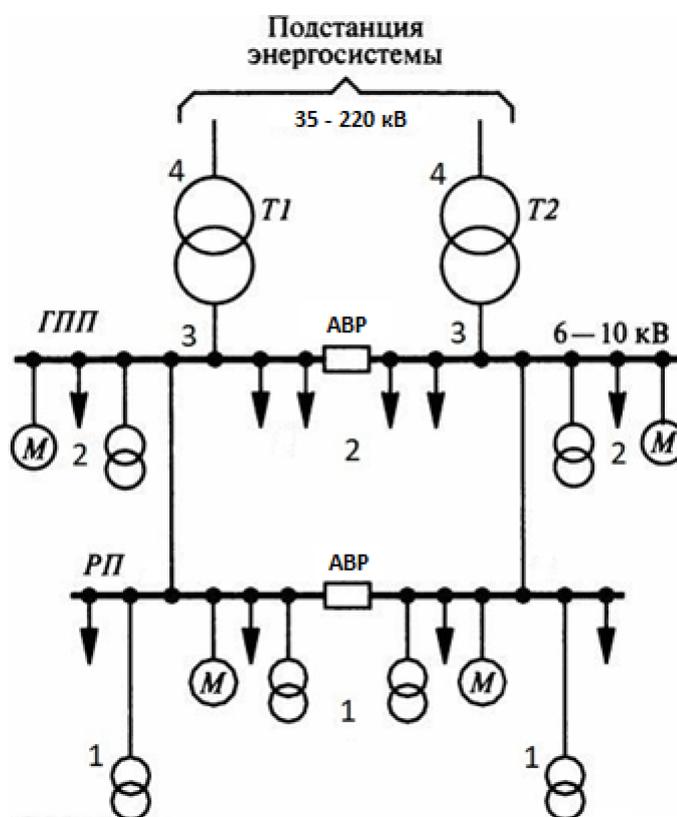


Рисунок 1.1 – Структурная схема системы электроснабжения промышленного предприятия

В состав структурной схемы входят следующие элементы: 1 – нагрузки на шинах РП, создаваемые каждой из отходящих линий; 2 – нагрузки на шинах ГПП, создаваемые каждой из отходящих линий; 3 – общая нагрузка на шинах ГПП; 4 - силовые трансформаторы.

Для обеспечения устойчивости режима и надежности электроснабжения электроустановок 1-й категории при кратковременных понижениях или

отключениях напряжения питающей сети используется самозапуск электродвигателей.

Самозапуск электродвигателей имеет следующие основные отличия от пуска:

1. В момент восстановления напряжения все двигатели или их значительная часть вращаются. При этом угловая скорость обеспечивает повышенный момент вращения двигателя в начале самозапуска по сравнению с пуском (при том же напряжении);

2. При отключении от сети одного или группы двигателей на шинах подстанции растет остаточная электродвижущая сила (ЭДС) и при этом ток включения двигателя может превышать пусковой ток в несколько раз;

3. При самозапуске включается одновременно группа двигателей, в результате чего в сети и её элементах растут токи, снижается напряжение на жазимах электродвигателей, что приводит к уменьшению вращающего момента;

4. Самозапуск происходит, как правило, при нагруженных технологических установках, что приводит к увеличению длительности разгона, а это вызывает повышение температуры обмоток двигателей из-за увеличения тока по сравнению с его номинальным значением [2-4].

Самозапуск в ряде случаев влияет на работу релейной защиты, в связи, с чем могут предъявляться соответствующие требования к ее расчету и схемам. Защита СД от асинхронного хода требует выдержки времени, достаточной для обеспечения разгона и вхождения в синхронизм в процессе самозапуска [5-6].

При применении самозапуска СД использовалась следующая последовательность действий:

- при аварии, осуществляется отключение ввода секции и гашение поля СД;
- срабатывает автоматическое включение резерва (АВР) и питание осуществляется от соседней секции;
- СД разворачиваются до подсинхронной частоты вращения, после чего подается возбуждение и двигатели входят в синхронизм [7].

В настоящее время в связи с внедрением устройств быстродействующих АВР (БАВР) стал возможен самозапуск СД, без необходимости гашения поля [12].

При аварийной ситуации выбег СД будет происходить за счет момента сопротивления от механизма. После устранения аварии в результате действия защиты может происходить электромагнитный переходный процесс из-за несинхронного включения возбужденных СД. В этом случае возникающие токи в обмотках двигателя и электромагнитные моменты могут значительно превышать соответствующие величины при коротких замыканиях (КЗ), а также при пуске СД.

После КЗ на смежном элементе сети, токи и электромагнитные моменты, как правило, меньше, чем при несинхронном включении, так как результирующий магнитный поток двигателя в этом случае значительно ослаблен из-за размагничивающего эффекта тока КЗ [10-11].

Проведенные исследования показали, что при внезапных кратковременных нарушениях возможны три последующих случая восстановления нормального режима питания:

1. При нарушении питания сетевые двигатели отключаются собственной релейной защитой;
2. При нарушении питания одна часть сетевых двигателей отключается защитой, а другая часть, после повторной подачи напряжения, участвует в самозапуске;
3. При нарушении питания все сетевые двигатели остаются подключенными к питающей сети и после восстановления питания участвуют в групповом самозапуске.

Успешные самозапуски сетевых двигателей являются эффективными по двум обстоятельствам [13-14]:

1. Сокращается время простоя, так как при внезапных отключениях двигателей повторное включение осуществляется, как правило, лишь после выяснения причин отключения, что требует значительного времени;
2. При одновременном пуске сетевых двигателей из холодного состояния наблюдается глубокая просадка напряжения вследствие больших пусковых токов, что затрудняет условия пуска самих двигателей.

Анализ работ, посвящённых самозапуску синхронных двигателей, показывает, что основное внимание специалистов концентрировалось как правило на исследовании электромеханических переходных процессов самозапуска [15-18]. Необходимо отметить, что в ранних исследованиях по самозапуску в число задач включалась оценка влияния механических переходных процессов при разгоне агрегата.

Обзор исследований, связанных с переходными процессами, показывает, что [19-21]:

- применение самозапуска электродвигателей экономически выгодно;
- при разработке мероприятий по обеспечению самозапуска учитываются влияния механических и электромеханических переходных процессов;

Однако практически во всех работах для определения условий самозапуска СД используются допущения, которые не позволяют учесть все факторы, влияющие на протекание переходных процессов синхронных электродвигателей. В то же время исследования переходных процессов в синхронном электроприводе методом имитационного моделирования позволяют проанализировать влияние на самозапуск таких значимых факторов как: структура и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, структура и параметры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей, одновременную работу нескольких синхронных электродвигателей различной мощности в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

Поэтому обоснование параметров самозапуска СД в промышленных электрических сетях на основе анализа переходных процессов с учётом перечисленных выше факторов является актуальной научной задачей, решение которой позволит повысить надёжность и экономичность работы электрооборудования на предприятиях.

1.2. Краткий обзор развития исследований режимов самозапуска электродвигателей промышленных установок

Внедрение самозапуска электродвигателей как средства повышения надежности работы электроустановок в практику работы электрических сетей тесно связано с внедрением и распространением противоаварийной автоматики.

Первые устройства противоаварийной автоматики появились в России еще в 90-х годах XIX в., когда с ростом и усложнением электрических сетей участились случаи аварий в электроустановках. Так, в 1901 году главный инженер Акционерного общества "Гелиос" в Петербурге П. А. Ковалев разработал и осуществил на практике автоматический перевод потребителей с поврежденной сети на "здоровую" с помощью электромеханического устройства [22], которое явилось прообразом современных устройств АВР. Позднее стали внедряться устройства АПВ. Так в литературе профессор И. И. Соловьев отмечает факт проведения первых опытов по автоматическому повторному включению линий электропередачи в 1916 г [23].

Однако вплоть до 30-х годов работы в области противоаварийной автоматики были весьма ограничены и направлены в основном на разработку и экспериментальное опробование различных конструкций устройств. Изучению режимов работы электрооборудования при действии устройств противоаварийной автоматики практически не уделялось внимания. Поэтому в литературе отсутствуют какие-либо сведения, касающиеся исследований самозапуска электродвигателей до этого периода.

Широкое внедрение противоаварийной автоматики в энергосистемах СССР началось по инициативе и под руководством И. А. Сыромятникова в 40-е годы [24]. Примерно к этому же времени относится начало распространения противоаварийной автоматики в энергосистемах за рубежом [25].

Начало проведению специальных исследований режимов самозапуска электродвигателей при кратковременных нарушениях питания было положено также И. А. Сыромятниковым в середине 30-х годов, показавшем допустимость сохранения включенного состояния двигателей при нарушении их питания. Уже в

первых своих работах, посвященных этому вопросу, И. А. Сыромятников дал ряд ценных рекомендаций по обеспечению самозапуска электродвигателей механизмов собственных нужд электростанций:

- отказ от защиты минимального напряжения у части электродвигателей или выполнение ее с большой выдержкой времени (порядка 10 с и более);
- отключение менее ответственных двигателей для обеспечения самозапуска более ответственных;
- форсировка возбуждения синхронных двигателей;
- гашение поля синхронных двигателей и других рекомендаций, описанных в его работах, опубликованных с 1935 по 1943 г [26-29].

Кроме того, им был сделан принципиально важный вывод о допустимости самозапуска возбужденных синхронных двигателей. Однако в области самозапуска СД эти первые исследования имели в основном теоретический характер, поскольку в это время синхронные двигатели еще не получили широкого применения в промышленности (первые мощные синхронные двигатели в нашей стране были выпущены в 1936 г.).

Во второй половине 30-х годов наряду с работами И. А. Сыромятникова появляются работы А. Б. Барзама, посвященные вопросам релейной защиты, противоаварийной автоматики и самозапуску электродвигателей. Так, в [30] им рассмотрены теоретические вопросы самосинхронизации и ресинхронизации синхронных двигателей при действии устройств противоаварийной автоматики.

На подземных горных работах первые исследования были выполнены в конце 30-х - начале 40-х годов.

Так, в работах Р. Ф. Трофимова [31] приводятся некоторые результаты исследования поведения шахтных механизмов при работе АПВ, на основании которых, в частности, указано на необходимость частичного отключения механизмов перед повторным включением. В работах К. Я. Шапошникова [32] даны теоретические и экспериментальные определения пределов устойчивости работы электродвигателей в зависимости от характера статического момента сопротивления механизмов при АПВ.

До середины 50-х годов преобладающая часть всех исследований в области самозапуска электродвигателей приходилась на долю асинхронных двигателей (в основном низковольтных). Так, в конце 40-х и начале 50-х годов значительный объем исследований самозапуска асинхронных двигателей (АД) был выполнен на предприятиях нефтяной промышленности. В статьях Н. С. Мосесова, М. А. Эскибяна, В. О. Саркисяна и др. [33-36] было показано, что на нефтяных промыслах глубинно насосные электроустановки разбросаны на большой территории, и в этих условиях при отсутствии самозапуска перерыв питания даже на несколько секунд вызывает продолжительную остановку (на 1–2 часа и более) глубиннонасосных установок. Время остановки значительно возрастает, если отключение происходит в ночное время или во время непогоды. Авторами этих работ были разработаны практические схемы, обеспечивающие как индивидуальный, так и групповой самозапуск АД насосных установок, а также предложена методика расчета параметров самозапуска асинхронных двигателей при магистральном питании. Ценность этих работ заключается еще и в том, что здесь впервые была доказана целесообразность применения самозапуска электродвигателей не только в установках, не терпящих даже кратковременных перерывов в электроснабжении из-за возможности создания аварийной ситуации, но и в установках, перерыв питания которых приводит к увеличению простоев и недоотпуску продукции.

В середине 50-х годов продолжаются исследования режимов самозапуска АД собственных нужд электростанций М. Г. Портным и Б. А. Хомутовым [37], а также Н. Х. Каспаровым проводятся экспериментальные работы по самозапуску асинхронных двигателей на заводах химической промышленности [38].

Примерно в это же время А. Н. Поповым, Г. Т. Адонцом и другими авторами была предложена разновидность самозапуска - автоматический повторный пуск под нагрузкой асинхронных двигателей (АПП) [39-40]. Впоследствии это мероприятие получило название автоматического повторного включения электродвигателей (АПВ). Целесообразность АПП (АПВ) двигателей возникает,

когда не обеспечивается одновременный самозапуск большого числа загруженных двигателей в результате глубокого снижения напряжения в сети при самозапуске.

Необходимо отметить, что способ АПП двигателей при своей относительной сложности не всегда может дать желаемые результаты. Так, при большом числе мощных двигателей с целью предотвращения их одновременного пуска из заторможенного состояния выдержка времени устройства АПП каждого двигателя должна приниматься различной. При этом общее время восстановления нормального рабочего режима всех потребителей может затягиваться и измеряться несколькими минутами. В этих условиях более рациональным может оказаться способ обеспечения группового самозапуска с предварительной автоматической разгрузкой мощных двигателей. Однако в статьях Г. Т. Адонца и А. Н. Попова этому не было уделено должного внимания [39-40].

На основании накопленного к 50-м годам опыта применения самозапуска электродвигателей в различных отраслях промышленности Техническим управлением МЭС СССР в 1954 г. был выработан противоаварийный циркуляр, рассматривающий самозапуск электродвигателей после кратковременных нарушений питания как обязательное средство по повышению надежности работы электроустановок потребителей [41].

Значительные исследования самозапуска электродвигателей (как асинхронных, так и синхронных) на подземных работах были выполнены в конце 60-х годов Б. Ф. Турышевым и Г. С. Хронусовым (Свердловский горный институт) [42-43]. В их работах не только приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования режимов самозапуска, но и дана вероятностная оценка надежности шахтных узлов нагрузки с учетом самозапуска электродвигателей стационарных установок.

Проведенные исследования режимов работы электродвигателей подземных потребителей при кратковременных перерывах электроснабжения способствовали более быстрому внедрению устройств АПВ и АВР в шахтные электрические сети.

На открытых горных разработках в СССР устройства противоаварийной автоматики в 60-х годах не получили широкого распространения. Достаточно

указать, например, что на предприятиях комбината "Красноярск уголь", имевшего в своем составе несколько крупных разрезов, устройствами АПВ было оборудовано всего лишь около 10% всех линий 6 кВ, причем эти устройства были установлены в основном на линиях, не питающих экскаваторные участки. В то же время многолетний опыт применения повторных включений линий персоналом подстанций вручную с выдержкой времени 2–5 минут показывал высокую эффективность этого мероприятия.

На карьерах некоторых зарубежных стран устройства противоаварийной автоматики получили значительное распространение. В литературе имеются сведения о применении на карьерах США устройств не только однократного, но даже и трехкратного АПВ в сетях, питающих мощные экскаваторы [44].

Отличительной особенностью исследований самозапуска в период с 1950 по 1980 годы является то, что в связи с ростом мощностей применяемых СД все больше внимания уделяется влиянию этих двигателей на питающую сеть в переходных режимах, вызываемых действием устройств сетевой автоматики. Не учет этого влияния при наличии синхронных двигателей с единичной мощностью в несколько тысяч киловатт может привести к нарушению устойчивости узла нагрузки и возникновению аварийной ситуации.

Позднее вопросы внедрения самозапуска регулярно поднимались на секциях энергетики научно-технических советов ряда Министерств. Так в решении научно-технического совета Министерства химической промышленности от 1977 года по вопросу «Основные организационно-технические мероприятия по повышению надежности и экономичности работы электроустановок» было указано, что вопросы самозапуска электродвигателей в целом по производствам не решаются на стадии проектирования и не всегда должным образом прорабатываются в процессе эксплуатации.

Позже в 1984 году, Н. М. Дворак внес вклад в повышение устойчивости синхронного электропривода поршневых компрессоров химических производств при авариях в системе электроснабжения и повышение эффективности средств самозапуска. В его диссертационной работе был определен оптимальный закон

управления возбуждением СД, разработана структура квазиоптимального возбудителя и другие важные исследования [45].

Важные экспериментальные исследования возможности самозапуска и его протекания в рабочем режиме были выполнены ОРГРЭС и его отделениями, ВНИИЭ, МЭИ и отдельными энергосистемами. Результаты этих испытаний выявили существенное влияние режима самозапуска электродвигателя на весь технологический процесс. Выявилось, что допустимая длительность самозапуска определяется в основном не нагревом электродвигателя, а изменением технологических параметров. Указанные испытания позволили существенно конкретизировать требования к обеспечению надежности работы агрегатов собственных нужд.

Наряду с работами И. А. Сыромятникова и А. Б. Барзама в 1985 г. выходит книга профессора Ю. М. Голоднова «Самозапуск электродвигателей». В которой автор учитывает самозапуск синхронных двигателей с различными системами возбуждения, релейной защиты и автоматики [46].

Дальнейшее развитие теории и практики применения самозапуска электродвигателей нашло свое отражение в работе К. Б. Носова и Н. М. Дворака «Способы и средства самозапуска электродвигателей», изданной в 1992 г. В которой авторы обратили внимание на ограничение числа самозапуска ответственных механизмов из-за недостаточности самозапускаемой мощности цеховых трансформаторов [47].

Вопросам самозапуска синхронных двигателей был посвящен и ряд работ зарубежных авторов, таких как Льюис, Марш, С. Беднарек [48-50].

Специальные исследования режимов самозапуска двигателей базируются на основе важнейших положений общей теории переходных процессов в машинах переменного тока, развитой в работах советских и зарубежных ученых: А. А. Горева, Е. Я. Казовского, М. П. Костенко, Л. М. Пиотровского, А. И. Важнова, В. Лайона, Ч. Конкорциа, К. П. Ковача, И. Рац и др [51-57].

Самые значительные по объему и содержанию исследования режимов самозапуска СД промышленных установок выполнены в период с середины 50-х

годов до настоящего времени. Развитию исследований самозапуска в этот период способствовал непрерывный процесс распространения синхронных двигателей в различных отраслях промышленности. В работах этого периода [22-68] освещены разнообразные вопросы, касающиеся разработки методики экспериментального исследования режимов самозапуска синхронных машин, методики расчетов параметров индивидуального и группового самозапуска, синхронизации СД под нагрузкой, предлагаются практические схемы ресинхронизации, определяется область допустимости несинхронного включения синхронных двигателей, исследуется устойчивость узлов нагрузок с мощными синхронными двигателями и др.

1.3. Особенности применения синхронных двигателей

Синхронные двигатели предназначены для привода рабочих машин, работающих с очень редкими пусками и не требующих регулирования частоты вращения (вентиляторы, воздуходувы, насосы, компрессоры и т. д.).

Рассмотрим применение синхронных двигателей на примере горных предприятий. В настоящее время применение на шахтах получили быстроходные поршневые компрессоры типа М с применяемой мощностью от 320 до 6300 кВт. Компрессоры в свою очередь, оснащаются синхронными электродвигателями типа СДК2, СДКП2 и ДСК с частотой вращения от 250 до 600 об/мин на напряжение 6 кВ. Для СДК в основном применяется прямой пуск двигателя, но при необходимости возможно использование пуска при пониженном напряжении с помощью реакторов и автотрансформаторов.

Для турбокомпрессоров широкое распространение получили высокоскоростные синхронные двигатели типов СТМ, СТД2, СТДМ с частотой вращения 3000 об/мин и мощность от 800 до 12 000 кВт на напряжение 6 (10) кВ. Для питания обмотки возбуждения СД выпускается возбуждательное устройство серии БВУ, основным элементом которого является бесщеточный возбудитель, представляющий собой синхронный генератор с мостовым полупроводниковым выпрямителем.

При использовании нескольких турбокомпрессоров применяются схемы группового пуска от одного общего реактора или автотрансформатора.

Для приводов вентиляторов главного проветривания в зависимости от мощности применяют различные типы СД: до 350 кВт – низковольтные синхронные двигатели, свыше 350 кВт – высоковольтные СД.

Для проветривания угольных шахт, где необходимы большие моменты инерции применяются синхронные двигатели типа СДВ, мощность которых варьируется от 400 до 2000 кВт, частота вращения 600 об/мин.

Для приводов шаровых и стержневых мельниц, а также насосов применяются двигатели типа 4СДМ, мощностью от 400 до 630 кВт и частотой вращения 250 об/мин.

Актуальность исследований самозапуска СД подтверждается анализом отключений, возникающих в процессе эксплуатации электротехнических систем, выполненный на примере распределительных сетей напряжением 6–10 кВ [96, 102–105].

В таблице 1.1 приведены данные по отключениям в электрических сетях ГОКов в период 2001–2003 гг. [96, 102–105].

Таблица 1.1

№	Причина отключения	Число срабатываний защиты				Итого	Итого %
		КРП-4	ПС «Фабрика»	ПС «Дальняя»	ПС «Алмаз»		
1	Отключения во время грозы	10	3	-	-	13	0.9
2	Схлестывание проводов ВЛ	39	59	9	23	130	9.2
3	Неисправность элементов ВЛ	29	19	11	8	67	4.7
4	Неисправность кабельных линий	79	56	32	1	168	11.8
5	Неисправность КТП, КРУ, КНО	10	24	12	1	47	3.3
6	Неисправность горных машин и оборудования	38	36	13	-	87	6.1
7	Пусковые режимы	27	19	9	3	58	4.1
8	Отключения при ОЗЗ на смежных линиях	121	70	1	-	192	13.5
9	Отказы в работе реле	4	9	1	-	14	1

защиты							
10	Повреждения линий горными машинами	26	14	4	1	45	3.2
11	Взрывные работы	19	10	-	-	29	2.1
12	Неустановленные причины	345	196	19	8	568	40.1
Число отключений		747	515	111	45	1418	100

В таблице 1.2 приведены данные по отключениям в период 2004 ÷ 2005 гг. в распределительных сетях 6–10 кВ [96, 102–105].

Таблица 1.2

№	Причина отключения	Число срабатываний защиты				Итого	Итого %
		РС 6 кВ		РС 10 кВ			
		N _{от}	%	N _{от}	%		
1	Отключения во время грозы	35	1,3	18	0,8	53	1,1
2	Схлестывание проводов ВЛ	97	3,6	67	3	164	3,3
3	Неисправность элементов ВЛ	426	15,6	375	16,6	801	16
4	Неисправность кабельных линий	436	16	349	15,5	785	15,8
5	Неисправность КТП, КРУ, ЯКНО	193	7,1	178	7,9	371	7,4
6	Неисправность горных машин и оборудования	120	4,4	112	5	232	4,7
7	Пусковые режимы	217	8	156	6,9	373	7,5
8	Отключения при ОЗЗ на смежных линиях	74	2,7	48	2,1	122	2,4
9	Отказы в работе реле защиты	16	0,6	15	0,7	31	0,6
10	Повреждения линий горными машинами	42	1,5	37	1,6	79	1,6
11	Взрывные работы	12	0,4	16	0,7	28	0,6
12	Неустановленные причины	1059	38,8	886	39,2	1945	39
Число отключений		2727	100	2257	100	4984	100

Из анализа таблиц 1.1 и 1.2 следует, что число отключений достаточно велико, и это напрямую влияет на число самозапусков электродвигателей. Поэтому проведение исследований в области анализа и последующей разработки комплекса мероприятий, связанных с обеспечением процесса самозапуска электродвигателей,

является актуальным, что в свою очередь позволит снизить аварийность в процессе эксплуатации электроустановок промышленных предприятий [69-72].

1.4. Особенности работы защиты и автоматики подстанции в случае кратковременного перерыва питания

При изучении процесса самозапуска электродвигателей необходимо учитывать особенности работы систем защиты и автоматики подстанции при кратковременных перерывах питания. Это связано с тем, что эти особенности существенно влияют на переходные процессы в электродвигателе и электрической сети.

Длительность провалов напряжения составляет чаще всего от 0,1 до 0,5 секунд. Если время провала напряжения превышает 0,2 с, то возможно выпадение двигателя из синхронизма. Чтобы этого избежать используют форсировку возбуждения, увеличивая напряжение возбуждения до 1,75 отн. ед. от номинального согласно ГОСТ 24688–81 [114]. Дальнейшее восстановление работы СД может осуществляться с помощью АВР с включением секционного выключателя между секциями шин или с помощью АПВ двигателей (в сочетании с АВР секционного выключателя).

Условием включения секционного выключателя для АВР является снижение напряжения на отключенной секции до 0,4 отн. ед. При подаче питания через АВР напряжение источника и напряжение на шинах могут оказаться в противофазе, поэтому и ждут снижения напряжения на двигателях. В системах с синхронными двигателями снижение напряжения осуществляется не быстро. Если используется быстродействующее АВР (БАВР), то сразу же после отключения вводного выключателя секции включается секционный выключатель (пока векторы напряжения на секциях шин не успели существенно разойтись по фазе).

Если произошло нарушение устойчивости, сопровождаемое большими колебаниями тока статора, надо отключить сами двигатели от секции шин выключателями на линиях питания, осуществить гашение поля СД, отключив обмотки от постоянного напряжения и замкнув на разрядное сопротивление. После

того как напряжение на поврежденной секции будет восстановлено действием АВР на секционный выключатель, осуществляется поочередное автоматическое включение СД (асинхронный пуск с подачей возбуждения на подсинхронной скорости) [99]. Примерная диаграмма работы автоматики подстанции для двигателей представлена на рисунке 1.2.

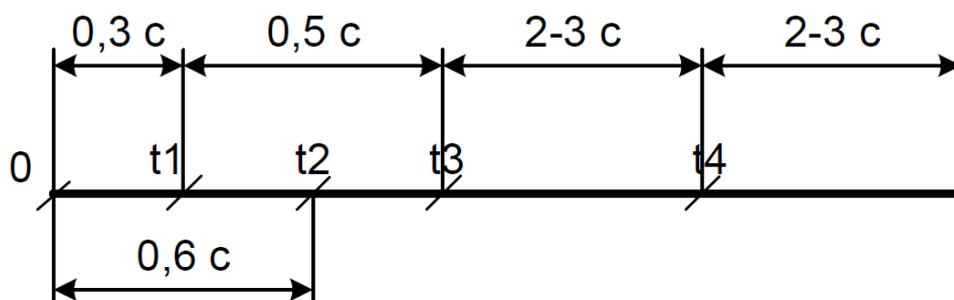


Рисунок 1.2 – Диаграмма работы автоматики при кратковременном перерыве питания

где t_1 – время от начала провала напряжения до отключения выключателей на линиях к СД; t_2 – время восстановления питания за счет включения секционного выключателя действием АВР; t_3 – время окончания гашения поля (от t_1); t_4 – время запуска и синхронизации первого СД.

Работа релейной защиты и автоматики РЗА в узлах нагрузки с СД и выбор параметров срабатывания защит электродвигателей рассмотрены в [73-75].

На основе анализа сведений приведенных в [73], можно сделать вывод, что подсистема РЗА на промышленных подстанциях 6–10 кВ обеспечивает следующие функции автоматики и защиты:

- максимальные токовые защиты (МТЗ);
- защита от потери питания (ЗПП);
- неселективные защиты от однофазных замыканий на землю;
- защиты от обрыва фазы;
- токовые отсечки;
- селективные защиты от ОЗЗ;
- защиты двигателей от перегрузки;

- защита минимального напряжения, резервирующая действие ЗПП. Защита отключает от секции СД при значительных просадках напряжений, исключающих возможность самозапуска;

- функция АВР, в общем случае может быть выполнена с контролем напряжения на секциях, частоты на секциях, напряжения обратной последовательности, срабатывания ЗПП;

- возможна установка устройства БАВР при использовании быстродействующих вводных и секционных выключателей.

Последовательность событий, происходящих при перерыве питания на секции вследствие отключения линии 35(110) кВ [73]:

- при отключении линии 35(110) кВ СД переходят в генераторных режим работы, в котором они могут длительное время поддерживать напряжение на секции. В этом режиме осуществляется подпитка других двигателей и нагрузки секции;

- амплитуда напряжения и частоты на секции постепенно уменьшается, увеличивается разница углов напряжения между секциями. При снижении напряжения до 0,8–0,85 от номинального, срабатывает форсировка возбуждения СД, вызывающая увеличение напряжения на секции, затем продолжается снижение напряжения;

- при срабатывании АВР, время между моментом перерыва питания и моментом срабатывания может достигать 10 секунд, при пуске АВР от ЗПП время может составлять несколько секунд;

- при использовании БАВР, запуск автоматики осуществляется по факту увеличения разницы углов между секциями либо по другим вспомогательным признакам; как показывает практика, время запуска БАВР может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд, в зависимости от количества синхронных потребителей.

Последовательность событий, происходящих при снижении напряжения на секции вследствие КЗ на выводах трансформатора 6(10) кВ [73]:

- при возникновении КЗ синхронные двигатели переходят в генераторных режим работы, в котором они осуществляют подпитку места КЗ, торможение СД и падение напряжения на их выводах происходят гораздо быстрее, чем при перерыве питания;

- подпитка продолжается до отключения места КЗ защитами линии; время срабатывания БАВР на линиях высокого напряжения составляет 50–100 мс; время срабатывания ЗПП ввода составляет 0,5–2 с.;

- при срабатывании ЗПП предусматривается запуск АВР, который в свою очередь срабатывает без выдержки времени.

1.5. Особенности систем автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей

Для регулирования тока возбуждения СД на промышленных предприятиях применяются статические и бесщеточные системы возбуждения. Статические системы возбуждения представляются в виде тиристорного преобразователя с питанием от отдельного трансформатора, подключенного к той же секции шин, что и синхронные электродвигатели. У таких систем постоянный ток подается непосредственно на обмотку возбуждения.

Автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) имеют цифровую систему управления, работающие на алгоритме ПИД, ПД или ППД₂ регулятора. Регулятор может иметь контур регулирования по реактивному току статора, по коэффициенту мощности либо по напряжению. Следует отметить, что могут быть выполнены и другие контуры регулирования.

Включение форсировки возбуждения в статических системах возбуждения предусматривается при снижении напряжения на секции шин ниже заданного значения. Статические возбудительные устройства отличаются высоким быстродействием – ввод форсировки осуществляется в интервале от 0,02 до 0,06 с.

Современные бесщеточные системы возбуждения представляют собой статический преобразователь, но питание обмотки возбуждения СД осуществляется от синхронного генератора, установленного на валу СД через

неуправляемые выпрямители. Синхронный генератор представлен в виде обращенной машины, обмотка возбуждения которого неподвижна и запитана через тиристорный преобразователь. С помощью управления током возбуждения генератора, тиристорный возбудитель управляет током возбуждения СД. Тиристорный регулятор реализует те же законы, что и статический возбудитель. Подобная система имеет преимущество – отсутствие щеточных контактов, это в свою очередь повышает надежность электродвигателя. Однако, у бесщеточных систем есть существенные недостатки – низкое быстродействие и низкое качество поддержания параметров работы СД по сравнению со статическими системами [21].

1.6. Теоретические исследования влияния кратковременного перерыва питания на работу синхронных двигателей

Подобные исследования влияния изменения напряжения на работу синхронных двигателей приведены в источниках [60-64, 100]. Далее приводится краткий обзор информации по данной тематике. Поскольку в данной работе рассматриваются только явнополюсные СД, все формулы приведены из расчета: $x_d \neq x_q$.

Необходимо разделить режимы перерыва питания СД:

- вызванные отключением линии;
- вызванные коротким замыканием (КЗ) в сети.

В случае КЗ возникает подпитка места короткого замыкания от синхронного двигателя, при этом торможение СД происходит быстрее, быстрее снижается частота и амплитуда напряжения на секции шин.

Далее рассмотрим влияние отклонения напряжения на угол нагрузки. Запишем общее выражение для активной мощности двигателя:

$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi.$$

Предположим, что значение мощности на валу двигателя сохранилось, а значение напряжения уменьшилось, следовательно, увеличится активная

составляющая тока $I \cdot \cos\varphi$. Электромагнитный момент явнополюсного СД может быть определен по выражению:

$$M = \frac{m \cdot U \cdot E_q}{x_d} \cdot \sin\delta + \frac{m \cdot U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\delta, \quad (1.1)$$

где m – число фаз обмотки статора, E_q – возбуждение ($E_q = x_{afd} \cdot I_f$, где I_f – значение тока возбуждения, приведенное к обмотке якоря, x_{afd} – индуктивное сопротивление реакции якоря), U – действующее значение напряжения питания двигателя, x_d и x_q – эквивалентные индуктивные сопротивления двигателя по продольной и поперечной осям, δ – угол нагрузки.

При отклонении напряжения сети от номинальных значений изменяется угол нагрузки δ . Из (1.1) видно, что при уменьшении напряжения сети U угол нагрузки δ будет увеличиваться. При больших значениях угла нагрузки δ синхронный двигатель выпадает из синхронизма [81].

Одной из причин неустойчивости системы электроснабжения может быть нехватка реактивной мощности. Далее рассмотрим влияние отклонения частоты на работы синхронной машины.

Электромагнитная мощность на валу машины с вентиляторной нагрузкой, может быть найдена по формуле:

$$P = m_n \cdot \omega^3. \quad (1.2)$$

Из (1.2) видно, что при снижении частоты на 5%, мощность на валу двигателя снижается примерно на 15%. При снижении частоты также уменьшается реактивная мощность, отдаваемая двигателем в сеть [80].

На основании изложенного делаем вывод о недопустимости отклонения напряжения и частоты для СД. Действующий ГОСТ 13109–97 [82] допускает:

- нормально допустимое и предельно допустимое отклонение напряжения сети $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ соответственно;
- нормально допустимое и предельно допустимое отклонение частоты сети $\pm 0,2\%$ и $\pm 0,4\%$ соответственно.

Далее рассмотрим влияние близкого КЗ на поведение синхронного двигателя. Схема замещения приведена на рисунке 1.3.

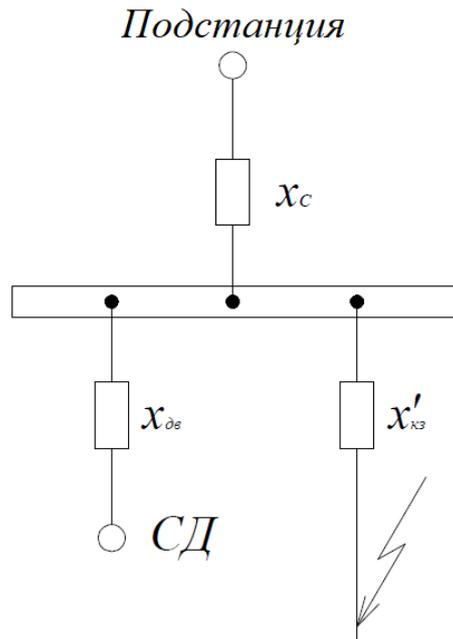


Рисунок 1.3 – Схема замещения близкого короткого замыкания для синхронного двигателя

При КЗ, в первый момент времени ($t=0$), ток в месте КЗ будет равен сумме токов источника питания и синхронного двигателя. Уравнения для схемы замещения, приведенной на рисунке 1.3 для $t=0$:

$$x_{с.кз} = x_c + x'_{кз} + \frac{x_c \cdot x'_{кз}}{x_{дв}}, \quad (1.3)$$

$$x_{дв.кз} = x_{дв} + x'_{кз} + \frac{x_{дв} \cdot x'_{кз}}{x_c}, \quad (1.4)$$

где $x_{с.кз}$ – индуктивное сопротивление между подстанцией и местом КЗ; $x_{дв.кз}$ – индуктивное сопротивление между СД и место КЗ; x_c – индуктивное сопротивление сети; $x'_{кз}$ – переходное сопротивление от шин подстанции до места КЗ; $x_{дв}$ – индуктивное сопротивление двигателя.

Периодические составляющие токов от системы и двигателей, будут соответственно равны в относительных единицах, в соответствии с принятой системой в [80]:

$$I_{с.кз} = \frac{U}{x_{с.кз}} \approx \frac{1,05}{x_{с.кз}}, \quad (1.5)$$

$$I_{дв.кз} = \frac{E''_q}{x_{дв.кз}} \approx \frac{1,05}{x_{с.кз}}, \quad (1.6)$$

где $I_{с.кз}$ – ток протекающий от подстанции к месту КЗ; $I_{дв.кз}$ – ток протекающий от СД к месту КЗ; U – напряжение сети в момент времени $t=0$; E''_q – напряжение развиваемое СД в генераторном режиме в момент времени $t=0$.

Следовательно, полный ток в точке КЗ равен:

$$I_{кз} = 1,05 \cdot \left(\frac{1}{x_{с.кз}} + \frac{1}{x_{дв.кз}} \right), \quad (1.7)$$

Максимальное значение напряжения на шинах при $t=0$ равно:

$$U_{ш} = 1,05 \cdot x'_{кз} \cdot \left(\frac{1}{x_{с.кз}} + \frac{1}{x_{дв.кз}} \right), \quad (1.8)$$

Сопротивление связи между СД и подстанцией:

$$x_{св} = x_{дв} + x_c + \frac{x_{дв} \cdot x_c}{x'_{кз}}, \quad (1.9)$$

Условие сохранения устойчивой работы двигателей при КЗ любой длительности будет равно:

$$\frac{x_{дв}}{x_{св}} \geq \left(\frac{m_{мвх}}{m_{смк} \cdot K_{ф}} \right)_{\max}, \quad (1.10)$$

где $m_{мвх}$ – момент на валу двигателя; $m_{смк}$ – максимальная кратность синхронного момента при номинальном возбуждении; $K_{ф}$ – кратность форсировки возбуждения.

Если к шинам подключена группа из нескольких СД, отношение $\frac{m_{мвх}}{m_{смк} \cdot K_{ф}}$ следует взять для того двигателя, для которого это отношение будет наибольшим. Сопротивление $x_{дв}$ для такого случая определяется из выражения:

$$\frac{1}{x_{дв}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{дв.i}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{p.i} + x''_{d.i}}. \quad (1.11)$$

Однако, следует учитывать, что выражение (1.10) дает величину напряжения на выводах СД без учета подпитки от самих двигателей. В действительности

напряжение на шинах при КЗ будет несколько выше, и для оценки устойчивости остаточное напряжение на шинах следует определять как отношение $\frac{x_{дв}}{x_{св}}$. Это напряжение также должно сопоставляться с наибольшей величиной критического напряжения:

$$U_{кр.макс} = \left(\frac{m_{мвх}}{m_{смк} \cdot K_{\phi}} \right)_{макс}. \quad (1.12)$$

При расчетах, когда действительное напряжение на шинах при КЗ с учетом подпитки от СД больше или равно 70% от номинального напряжения, принимают $x_{сд} = 0,7$. Если остаточное напряжение на шинах ниже 70% от номинального напряжения, сопротивления двигателей принимаются $x_{сд} = x_{кз}$.

В случаях, когда выполняется условие:

$$\frac{x_{дв}}{x_{св}} < \left(\frac{m_{мвх}}{m_{смк} \cdot K_{\phi}} \right)_{макс}, \quad (1.13)$$

СД, подключенные к шинам, начинают торможение. Скорость изменения угла нагрузки δ будет зависеть от того, насколько максимальное значение электромагнитного момента будет меньше момента на валу. В общем случае для определения скорости изменения угла нагрузки $\delta(t)$ необходимо решить уравнение:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{двиг} - M_{мвх}, \quad (1.14)$$

где J – суммарный момент инерции двигателя и механизма; $M_{двиг.эл}$ – вращающий момент двигателя; $M_{мвх}$ – механический момент сопротивления нагрузки.

Вращающий момент СД представляет собой совокупность асинхронного момента M_a , синхронного момента M_c и генераторного момента M_f , обусловленного только током возбуждения. Учитывая, что асинхронный и синхронный моменты ускоряют ротор двигателя, а генераторный момент, наоборот, тормозит его, выражение (1.14) запишем в виде:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_a + M_c - M_f - M_{мвх}. \quad (1.14)$$

Постоянная инерции H и механическая постоянная времени τ_j двигателя определяются как:

$$2H = \frac{GD^2 \cdot n_0^2}{365 \cdot S_H}, \quad (1.15)$$

$$\tau_j = \frac{GD^2 \cdot n_0^2}{365 \cdot P_H} = 2H \cdot \cos\varphi_H, \quad (1.16)$$

где n_0 – скорость вращения.

В относительных единицах запишем:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 2H \cdot \frac{ds}{dt} = 2H \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \cos\varphi_H. \quad (1.17)$$

С учетом выражений для моментов M_a, M_c, M_f выведенных в [80], уравнение движения (1.14) можно записать:

$$\begin{aligned} 2H \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \cos\varphi_H = \\ &= \frac{1}{2} \cdot U^2 \left(\operatorname{Im} \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \right) + \frac{U \cdot E_q}{x_d} \cdot \sin\delta - \left(\frac{E_q}{x_d} \right)^2 \cdot \frac{r}{1-s} - M_{\text{МВХ}}. \end{aligned}$$

При отсутствии питания, составляющие синхронного M_c и асинхронного M_a моментов будут равны нулю и уравнение движения примет следующий вид:

$$\tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \tau_j \cdot \frac{ds}{dt} = M_{\text{МВХ}} + \left(\frac{E_q}{x_d} \right)^2 \cdot \frac{r}{1-s} \cdot \frac{1}{\cos\varphi_H}. \quad (1.18)$$

Составляющая генераторного момента появляется при подпитке места КЗ. Как правило, этот режим непродолжителен, и можно считать генераторный момент не зависящим от скольжения. При синхронной частоте вращения и номинальном возбуждении этот момент составляет 10–20% от номинального момента двигателя, и может быть учтен в соответствии с выражением:

$$\tau_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_{\text{МВХ}} + (0,1 \div 0,2) \cdot K_\phi^2. \quad (1.19)$$

При кратковременном перерыве питания генераторный момент отсутствует. Тогда решение уравнения (1.18) будет:

$$s = \frac{M_{\text{МВХ}}}{\tau_j} \cdot t, \quad (1.20)$$

где t – время прошедшее после отключения питания.

Если от шин подстанции питается группа двигателей, то при близком КЗ их выбег будет происходить по индивидуальным характеристикам. При отключении группы двигателей от сети их выбег будет групповым пока напряжение не упадет ниже 40–50% от номинального напряжения. Если в выбеге участвуют асинхронные двигатели, то генераторный момент имеет место быть, однако величина этого момента значительно меньше, чем при КЗ и им можно пренебречь.

Для определения угла поворота оси ротора относительно вектора напряжения необходимо проинтегрировать выражение (1.19):

$$\delta = \delta_0 + \frac{M_{\text{МВХ}} \cdot t^2}{2 \cdot \tau_j}, \quad (1.21)$$

где $\delta_0 = \text{arctg} \frac{x_q \cdot P_0}{U_0^2 + x_q \cdot Q_0}$ – определяется предшествующей нагрузкой для группового выбега.

Если в выражение (1.21) подставить τ_j и t в секундах, угол поворота оси ротора в радианах определится как:

$$\delta = \delta_0 + \frac{\pi \cdot f_0 \cdot M_{\text{МВХ}} \cdot t^2}{2 \cdot \tau_j}. \quad (1.22)$$

В практических расчетах пользуются критерием 100%-ной вероятности вхождения в синхронизм:

$$s_{\text{ср}} \leq s_{\text{кр}} = 1,05 \cdot \sqrt{\frac{m_{\text{СМК}}}{\tau_j}}, \quad (1.23)$$

где $s_{\text{ср}}$ – среднее скольжение, соответствующее точке пересечения характеристики механического момента на валу со средней асинхронной характеристикой.

Из уравнения (1.23) можно найти время, за которое ротор отстанет от вектора напряжения сети на угол $\delta_0 + \pi$:

$$t_{\delta_0 + \pi} = \sqrt{\frac{\tau_j}{50 \cdot M_{\text{МВХ}}}}. \quad (1.24)$$

Подставив (1.20) в (1.23) получим:

$$s = \frac{M_{\text{МВХ}}}{\tau_j} \cdot t \leq 1,05 \cdot \sqrt{\frac{m_{\text{СМК}}}{\tau_j}}. \quad (1.25)$$

Откуда находим предельное время отключения, при котором обеспечивается 100%-ная вероятность вхождения в синхронизм:

$$t_{\text{пер}} \leq \frac{1,05}{M_{\text{МВХ}}} \cdot \sqrt{m_{\text{СМК}} \cdot \tau_j}. \quad (1.26)$$

В общем случае расчеты представленные в [80] для реальных двигателей показывают, что допустимое время перерыва питания, при котором обеспечивается 100%-ная вероятность успешной ресинхронизации не превышает 0,3 секунды.

Необходимо иметь в виду, что успешная ресинхронизация возможна и при времени перерыва питания, превышающем время из (1.26) в случае благоприятного соотношения момента нагрузки, генераторного момента обусловленного возбуждением и асинхронного момента:

$$m_a > m_{\text{мех}} + m_f.$$

1.7. Особенности методики обоснования параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях

Решение задачи обоснования параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях можно получить путем проведения соответствующих экспериментов на реальном объекте. Однако непосредственное экспериментирование в этом случае имеет значительные недостатки, связанные с тем, что действующая установка уже должна удовлетворять тем требованиям, которые в неё закладывались при проектировании. Вносить изменения в систему в процессе ее испытаний и эксплуатации зачастую невозможно. В то же время при построении модели реальной системы на ней могут быть проведены необходимые эксперименты с минимальными затратами. По этим причинам наиболее рациональным методом исследования подобных сложных систем является метод имитационного моделирования, под которым понимается процесс создания модели реальной системы и постановки экспериментов с целью понимания поведения системы, либо оценки различных стратегий,

обеспечивающие функционирование данной системы при учете реальных ограничений [113].

При исследовании самозапуска СД в промышленных электрических сетях, возможны различные подходы к математическому описанию рассматриваемой системы. Основная проблема заключается в том, что необходимо учитывать внутреннее сопротивление источника питания, влияние всех элементов системы через питающую сеть друг на друга, электромагнитные и электромеханические процессы в СД, его систему регулирования возбуждения и т. д. Поэтому при исследовании систем рассматриваемого типа необходимо решать систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, описывающих работу каждого элемента системы. Это позволяет полностью исследовать все процессы, которые имеют место при самозапуске СД в промышленных электрических сетях. В этом случае удобно использовать стандартные программные пакеты для моделирования, например MATLAB (Simulink). Подобные пакеты имеют набор стандартных блоков, позволяющих моделировать реальные электротехнические системы, в том числе проводить исследования переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя.

Основная трудность исследования переходных процессов синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях, заключается в том, что работу электродвигателя в таких системах нельзя рассматривать изолированно от СЭС. Поэтому при моделировании переходных процессов необходимо учитывать взаимное влияние синхронного электродвигателя и промышленной электрической сети.

На условия самозапуска СД в случае кратковременных перерывов питания или коротких замыканий влияют такие значимые факторы как: структура и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, структура и параметры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей, электромагнитные и электромеханические процессы синхронного электродвигателя. Следовательно, на характеристики рассматриваемой системы оказывает влияние большое число факторов.

Основная цель проведения экспериментов на ЭВМ состоит в более глубоком изучении поведения и свойств исследуемых электротехнических систем. Так как их характеристики определяются в той или иной мере всеми элементами, входящими в состав системы, то число возможных сочетаний их параметров при исследовании может достигать очень большого значения. Следовательно, если не проводить предварительного планирования экспериментов, то имитационное моделирование потребует наряду с затратами труда и времени экспериментатора также значительных затрат машинного времени. Поэтому, наряду с созданием модели системы в виде соответствующего математического описания, необходимо планировать проведение экспериментов, чтобы получить желаемую информацию при минимальных затратах. Учитывая приведенные замечания, исследование процессов самозапуска СД в промышленных электрических сетях удобно проводить при помощи методов, разработанных в теории планирования эксперимента (ТПЭ), когда эксперимент планируется оптимальным образом, т. е. при одновременном варьировании всех факторов. В связи с этим на первой стадии исследования необходимо проведение экспериментов, позволяющих выявить факторы, которые мало влияют на те или иные величины, характеризующие работу системы. Кроме этого, предварительные эксперименты дают возможность установить приближенно общий характер интересующих исследователя зависимостей [113].

1.8. Выводы по первой главе и постановка задачи исследования

Проведенный анализ показал, что современные технологические процессы ряда промышленных производств характеризуются наличием сложных взаимосвязей технологических агрегатов и их приводов – электродвигателей. Особенностью этих взаимосвязей является отключение электроприводов в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания. Как показано на примере горных предприятий, число аварийных отключений достаточно велико, что напрямую влияет на количество самозапусков электродвигателей. Поэтому актуальным является проведение дальнейших исследований в области анализа и

последующей разработки комплекса мероприятий, связанных с обеспечением процесса самозапуска электродвигателей, что позволит снизить аварийность в процессе эксплуатации электроустановок промышленных предприятий.

Исходя из анализа состояния вопроса поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработать компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя, учитывающие структуру и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, систему автоматического регулирования возбуждения и одновременную работу нескольких электродвигателей.

2. Методом имитационного моделирования получить зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, характеризующие особенности самозапуска вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

3. Обосновать параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

2.1. Реализация модели синхронного двигателя

В данной работе задача моделирования электротехнических систем с синхронным двигателями решается в комплексе MATLAB (Simulink) [9, 108–112].

При использовании модели СД принимаются следующие условия и допущения:

1. моделирование выполняется в системе координат d-q;
2. насыщение и гистерезис намагничивающей характеристики магнитопровода не учитывается;
3. эффект вытеснения тока не учитывается;
4. асимметрия обмоток статора не учитывается;
5. обмотка возбуждения считается одноосной;
6. демпферная обмотка приводится к двум короткозамкнутым обмоткам с перпендикулярными осями.

Несмотря на принимаемые условия и допущения, переходные процессы, протекающие в СД, практически совпадают с переходными процессами их математической модели, учитывающей по три контура в каждой из синхронных осей [83].

Схемы замещения СД в Simulink-модели MATLAB по продольной и поперечной осям имеют вид, представленный на рисунке 2.1 [8].

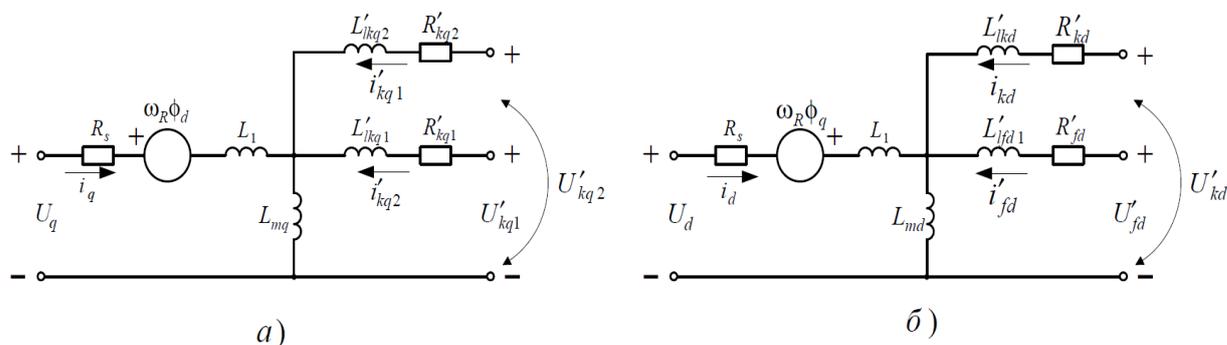


Рисунок 2.1 – Схемы замещения синхронного двигателя в Simulink-модели
MATLAB

На рисунке 2.1 приняты следующие обозначения: U_d, U_q – напряжение якорной обмотки по продольной и поперечной осям; U'_{fd} – напряжение обмотки возбуждения; $U'_{kd}, U'_{kq1}, U'_{kq2}$ – напряжение демпферных обмоток; i_d, i_q – токи якорной обмотки; i'_{fd} – ток обмотки возбуждения; $i'_{kd}, i'_{kq1}, i'_{kq2}$ – токи демпферных обмоток; ϕ_d, ϕ_q – потокосцепления; ω_R – угловая скорость ротора; L_1 – индуктивность якорной обмотки; $L'_{lkd}, L'_{lkq1}, L'_{lkq2}$ – индуктивность демпферных обмоток; L'_{lfd1} – индуктивность обмотки возбуждения; L_{md}, L_{mq} – взаимные индуктивности между обмотками; R_s – активное сопротивление якорной обмотки; $R'_{kd}, R'_{kq1}, R'_{kq2}$ – активные сопротивления демпферных обмоток; R'_{fd} – активное сопротивление обмотки возбуждения.

Для исследования влияния величины мощности СД на режим самозапуска были взяты явнополюсные двигатели СДВ-15-39-10 и СДВ-16-64-12.

В таблицах 2.1–2.2 приведены необходимые параметры модели СД, полученные на основании паспортных данных явнополюсных двигателей СДВ-15-39-10 (табл. 2.1) и СДВ-16-64-12 (табл. 2.2) по методике, приведенной в [77].

Таблица 2.1.

Обозначение параметра	Название параметра	Значение параметра
$U_{\text{ном}}$	Номинальное напряжение двигателя	6 кВ
$S_{\text{ном}}$	Номинальная полная мощность двигателя	880 кВА
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	Номинальный коэффициент мощности двигателя	0,9
x_d	Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,97 о.е
x_q	Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,61 о.е
x''_d	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,32 о.е
x''_q	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,29 о.е
T'_{d0}	Переходная постоянная времени при разомкнутой обмотке статора	0,75 с
T''_{d0}	Сверхпереходная постоянная времени при замкнутой обмотке статора	0,36 с
R_a	Активное сопротивление обмотки статора	0,028 о.е
L_{kd}	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси d	0,187 о.е
L_{kq}	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси q	0,102 о.е

L_f	Индуктивность рассеяния обмотки возбуждения	0,38 о.е
R_f	Активное сопротивление обмотки возбуждения	0,23 о.е

Таблица 2.2.

Обозначение параметра	Название параметра	Значение параметра
$U_{\text{ном}}$	Номинальное напряжение двигателя	6 кВ
$S_{\text{ном}}$	Номинальная полная мощность двигателя	2222 кВА
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	Номинальный коэффициент мощности двигателя	0,9
x_d	Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси	1,04 о.е
x_q	Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,91 о.е
x''_d	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,28 о.е
x''_q	Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,27 о.е
T'_{d0}	Переходная постоянная времени при разомкнутой обмотке статора	3 с
T''_{d0}	Сверхпереходная постоянная времени при замкнутой обмотке статора	1,15 с
R_a	Активное сопротивление обмотки статора	0,0098 о.е
L_{kd}	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси d	0,17 о.е
L_{kq}	Индуктивность рассеяния демпферной обмотки по оси q	0,09 о.е
L_f	Индуктивность рассеяния обмотки возбуждения	0,28 о.е
R_f	Активное сопротивление обмотки возбуждения	0,21 о.е

На основании проведенных экспериментов с полученной моделью можно сделать вывод, что встроенные модели Simulink MATLAB схожи с моделями, которые используются в специализированных программных пакетах и могут быть использованы для расчета самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания. Это подтверждается другими работами, например [84].

2.2. Реализация моделей источников питания, ЛЭП, трансформаторов

Кроме синхронных двигателей в работе модели СЭС промышленного предприятия используются следующие элементы:

- эквивалент СЭС;
- модель ЛЭП, питающих подстанцию с СД;
- модели трансформаторов типа ТДНС–16000/35/6.

Поскольку мощность, потребляемая СД мала в сравнении с мощностью СЭС, шины подстанции будем считать шинами, питающимися от источника бесконечной мощности. Схема эквивалента источника питания представлена на рисунке 2.2, а в модели реализована на основе встроенной модели MATLAB/Simulink «Three-Phase Source».

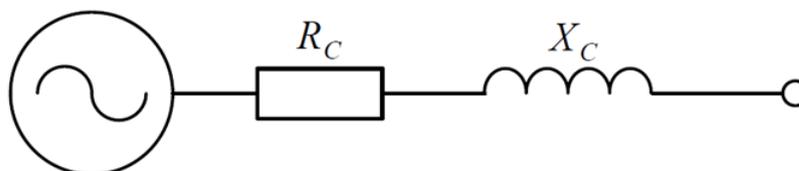


Рисунок 2.2 – Схема источника питания Simulink Three-Phase Source

Параметры источника питания при этом задаются постоянным напряжением, и последовательно включенными активным и реактивным сопротивлениями. Для определения параметров эквивалентного источника питания были использованы следующие данные:

- параметры линий связи предприятия с энергосистемой;
- параметры понижающих трансформаторов типа ТДНС–16000/35/6;
- при выполнении расчета эквивалента источника питания, токами утечки пренебрегаем, вследствие их сравнения с токами КЗ на шинах 6(10) кВ;
- при выполнении расчета насыщением стали трансформаторов пренебрегаем.

Последние два допущения выполнены аналогично допущениям, принимаемым при расчете тока КЗ [85].

В соответствии с исследованиями [85] и [86] была составлена схема замещения элементов связи шин 6 кВ и шин 35 кВ. Схема замещения представлена на рисунке 2.3.

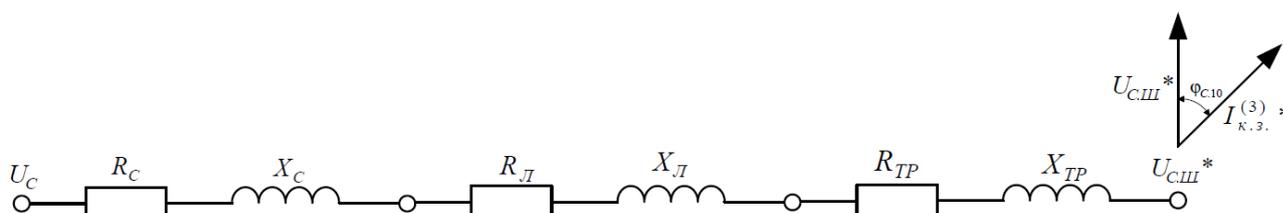


Рисунок 2.3 – Схема замещения для определения параметров эквивалентного источника питания

На рисунке 2.3 приняты следующие обозначения: U_c – напряжение на шинах бесконечной мощности; R_L – активное сопротивление линии электропередачи 35 кВ; X_L – индуктивное сопротивление линии электропередачи 35 кВ; R_{TP} – активное сопротивление понижающего трансформатора; X_{TP} – индуктивное сопротивление понижающего трансформатора; $I_{к.з.}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания на шинах 6 кВ, приведенный к напряжению 35 кВ.

Модель трансформатора с расщепленными обмотками выполнена на основе встроеной модели MATLAB/Simulink «Three-Phase Transformer (Two Windings)».

2.3. Реализация модели системы электроснабжения промышленного предприятия

Для реализации компьютерной модели СЭС в программном комплексе MATLAB (Simulink) было принято решение использовать наиболее распространенную типовую структурную схему системы электроснабжения предприятия, которая приведена на рисунке 1.1 первой главы.

Обобщенная модель СЭС с учетом, приведенных выше особенностей приведена на рисунке 2.4. Она включает в себя следующие элементы:

- трехфазные источники питания напряжением 35 (110) кВ представлены блоками *ВВОД 1* и *ВВОД 2* и реализуются с помощью блоков Three-Phase Source;
- высоковольтные выключатели представлены блоками *Breaker* и *ABP* и реализуются с помощью блоков Three-Phase;
- силовые трансформаторы представлены блоками *ТДНС-16000/35/6* и реализуются с помощью блоков Three-Phase Transformer (Two Widing);
- нагрузка на шинах 6 кВ представлена блоками *Load* и реализуются с помощью блоков Three-Phase Series RLC Load;
- осциллографы представлены блоками *Scope*;
- явнополюсные СД представлены элементами *СД*, являющиеся блоками Synchronous Machine;
- элементы *Exciter* являются моделями систем управления возбуждением СД.

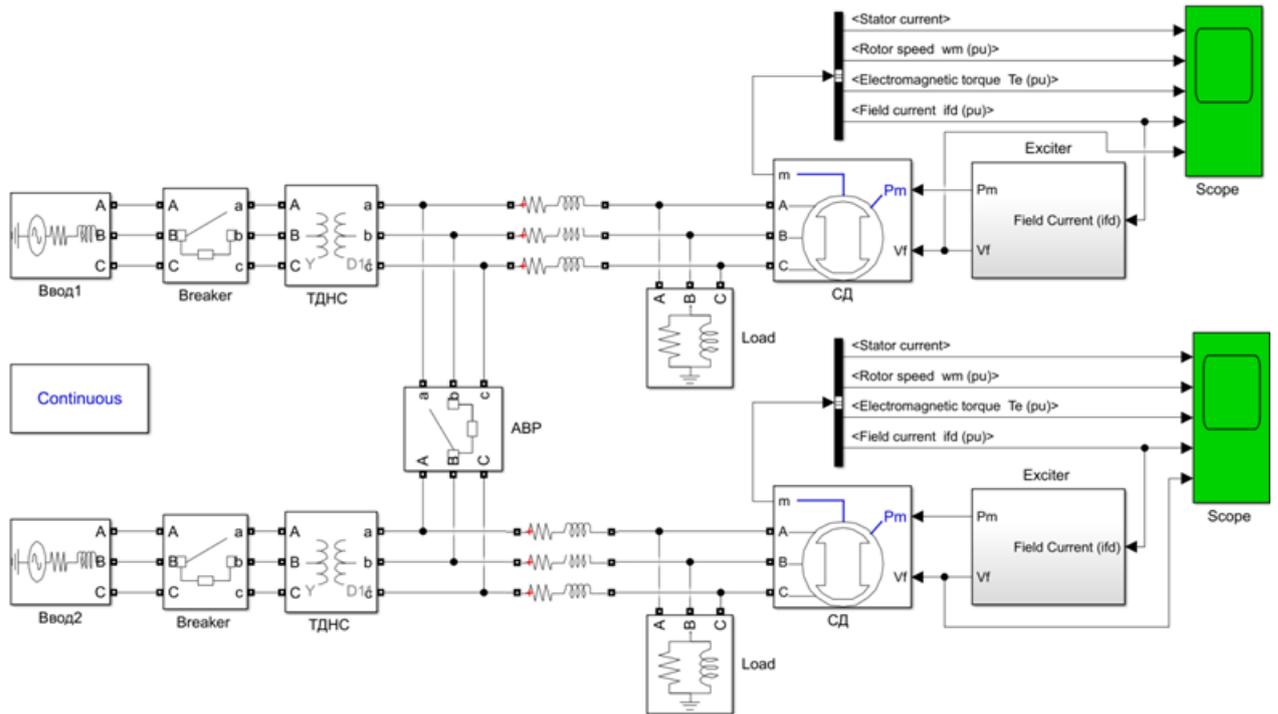


Рисунок 2.4 – Обобщенная модель системы электроснабжения предприятия

2.4. Реализация моделей систем автоматических регуляторов возбуждения синхронных электродвигателей

В настоящее время моделирование системы АВР осуществляется в программах: Mustang, DAKAR, EUROSTAG и др. В указанных программах присутствуют встроенные модели систем возбуждения, которые имеют следующие ограничения [11]:

- модели предназначены для управления током возбуждения моделей синхронных генераторов;
- нет подчиненного контура регулирования по току возбуждения;
- нет возможности реализации ПИД-регулятора в контуре напряжения статора и тока возбуждения;
- моделируется только автоматическое гашение поля (АГП), гашение поля путем рекуперации энергии в сеть не моделируется.

В связи с вышеуказанным применение существующих моделей систем АВР в данной работе, нецелесообразно.

Поскольку моделирование выполняется в среде MATLAB (Simulink), встроенные модели статических систем возбуждения имеют следующие недостатки:

- отсутствуют контуры регулирования по коэффициенту мощности, по реактивной мощности;
- не предусмотрено моделирование релейной форсировки возбуждения;
- не учитывается изменение напряжения питания возбудителя.

На основании источников [87-93] были изучены алгоритмы работы систем возбуждения, в результате чего были сделаны следующие выводы:

- система APB может иметь контур регулирования: по напряжению на секции шин, по реактивной мощности, по углу нагрузки, по реактивному току статора;
- системы APB допускают работу в определенном диапазоне изменения напряжения и частоты на шинах двигателя;
- гашение поля может осуществляться инвертированием либо включением на разрядное сопротивление;
- при моделировании бесщеточной системы возбуждения, необходимо учесть передаточную функцию возбудителя на валу двигателя.

В связи с этим было принято решение реализовать собственную модель системы APB в среде MATLAB (Simulink). В качестве базовой модели выбрана модель системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ), которая реализована в [12], [20] и представлена на рисунке 2.5. Основой системы возбуждения является тиристорный преобразователь с цифровой системой управления.

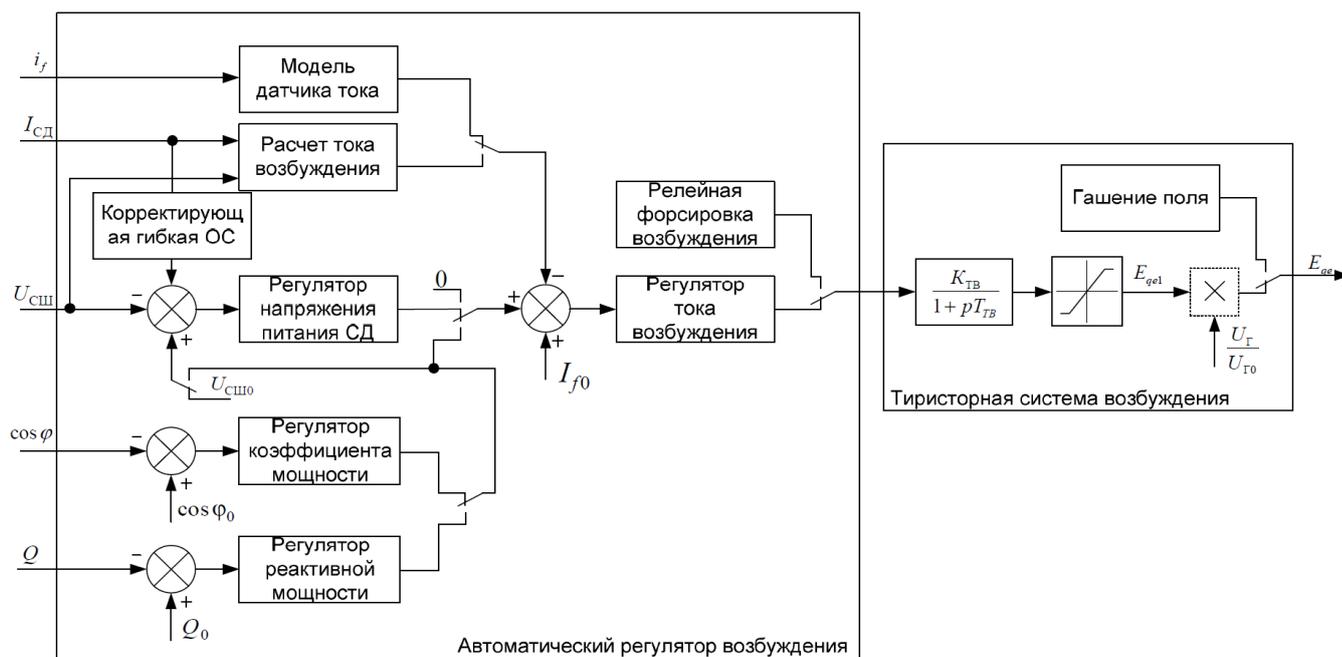


Рисунок 2.5 – Модель системы автоматического регулирования возбуждения

Для реализации систем АРВ по току возбуждения и реактивной мощности в моделях применены блоки *PID Controller*, которые обеспечивают автоматическую настройку параметров соответствующего регулятора. Посредством блока *PID Controller* возможна реализация PID, PI, PD, P и I-регуляторов [21].

PID Controller представляет собой одноконтурный настраиваемый блок PID-регулятора Simulink. При запуске программное обеспечение автоматически вычисляет линейную модель объекта управления из модели Simulink (идентифицирует ввод и вывод объекта и использует текущую рабочую точку для линеаризации, объект может иметь любой порядок и может иметь задержки) и проектирует начальный контроллер. Затем, путем ручной корректировки критериев расчета в двух режимах проектирования тюнер вычисляет параметры регулятора, которые надежно стабилизируют систему.

2.4.1. Синхронный электродвигатель с обратной связью по току возбуждения

Рассмотрим структурную схему электродвигателя с обратной связью по току возбуждения ΔI_f представленную на рисунке 2.6.

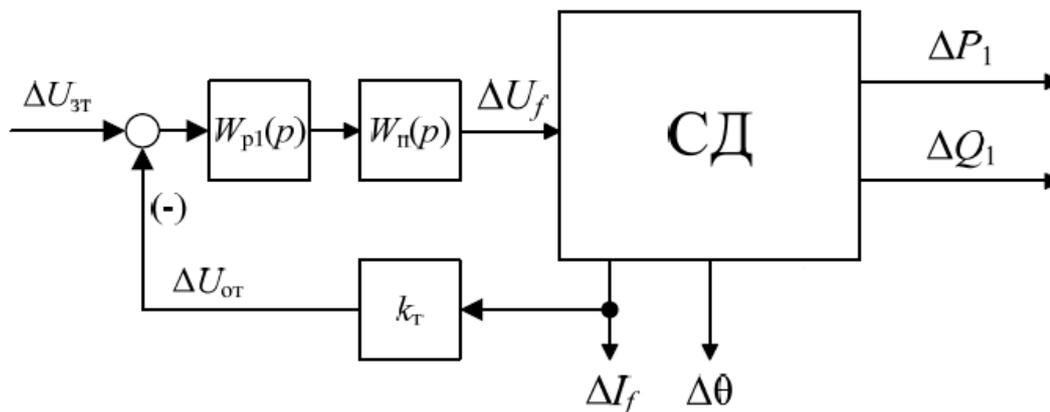


Рисунок 2.6 – Структурная схема контура регулирования тока возбуждения

В состав структурной схемы входят следующие элементы: - блок синхронного двигателя; - тиристорный возбудитель $W_{П}(p)$ с коэффициентом усиления 30 и постоянной времени равной 0,01; - регулятор тока возбуждения $W_{PI}(p)$ с реализацией ПИ-регулятора; датчик тока возбуждения k_T .

Реализация модели системы электроснабжения с синхронными двигателями и контурами регулирования тока возбуждения в среде Matlab Simulink представлена на рисунке 2.7.

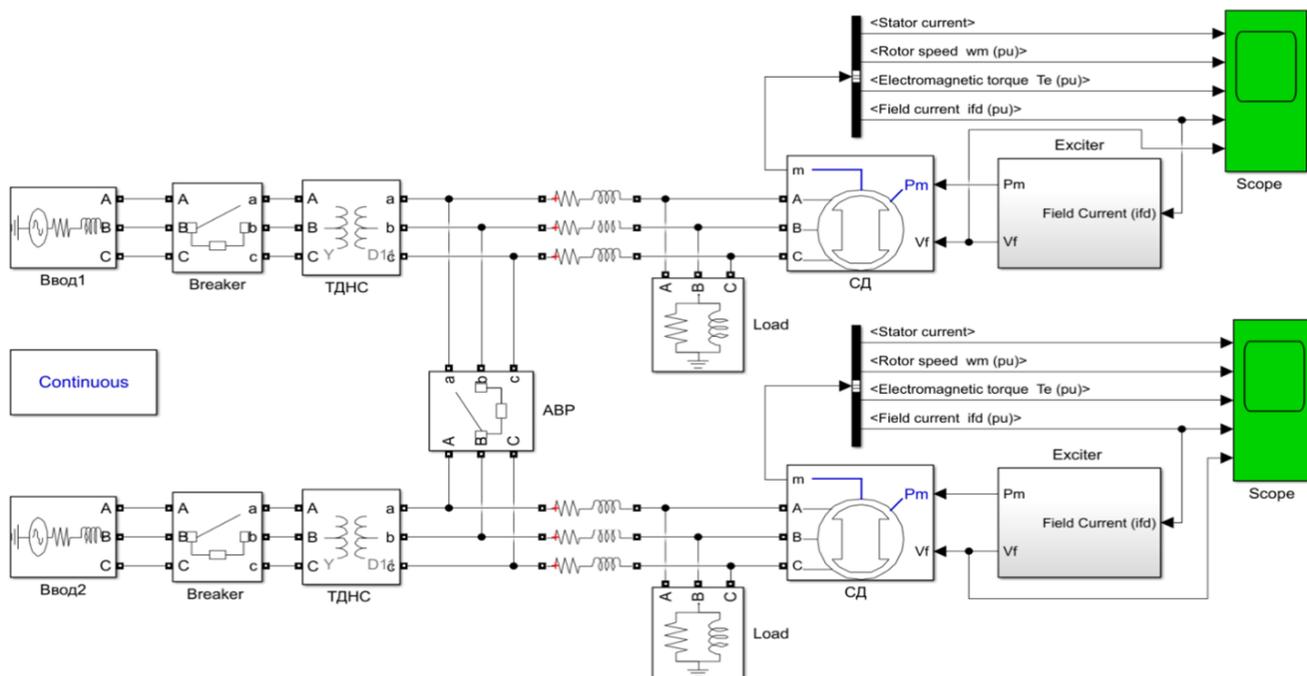


Рисунок 2.7 – Модель системы электроснабжения с синхронными двигателями, содержащими контуры регулирования тока возбуждения

Переходная характеристика контура по управляющему воздействию представлена на рисунке 2.8.

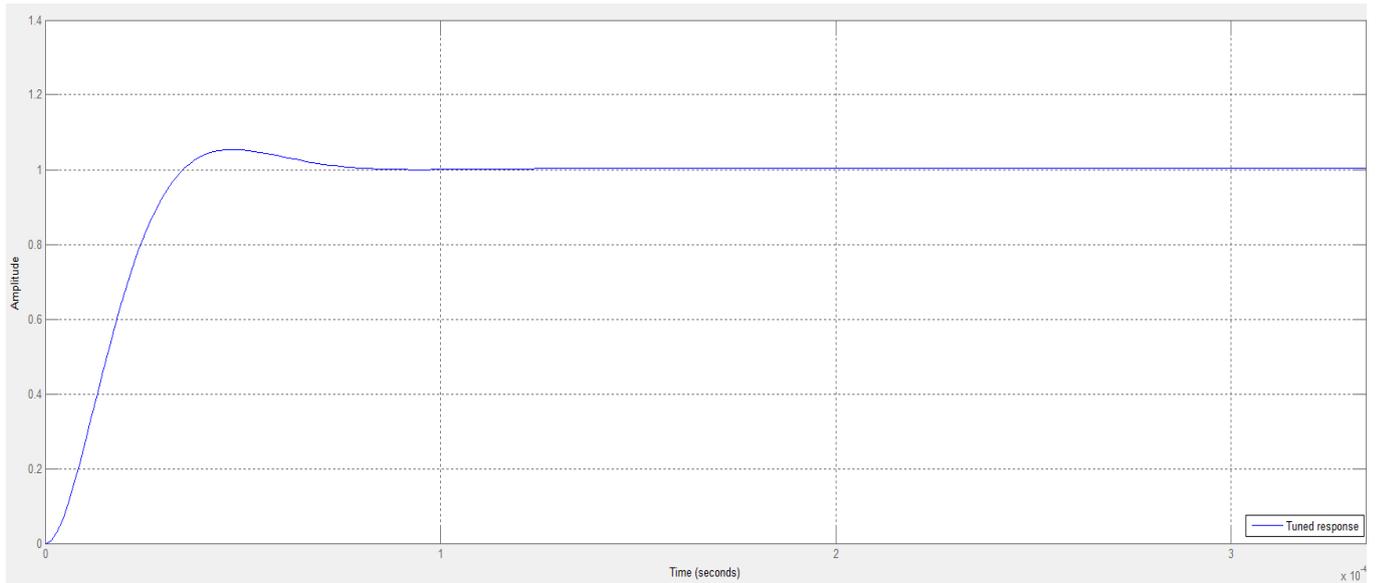


Рисунок 2.8 – Переходная характеристика по управляющему воздействию

Переходные процессы: ток статора - ΔI_s , скорость ротора - ΔW_m , электромагнитный момент - ΔT_e , ток возбуждения - ΔI_{fd} и напряжение возбуждения - ΔV_f при $t = 3$ сек представлены на рисунке 2.9.

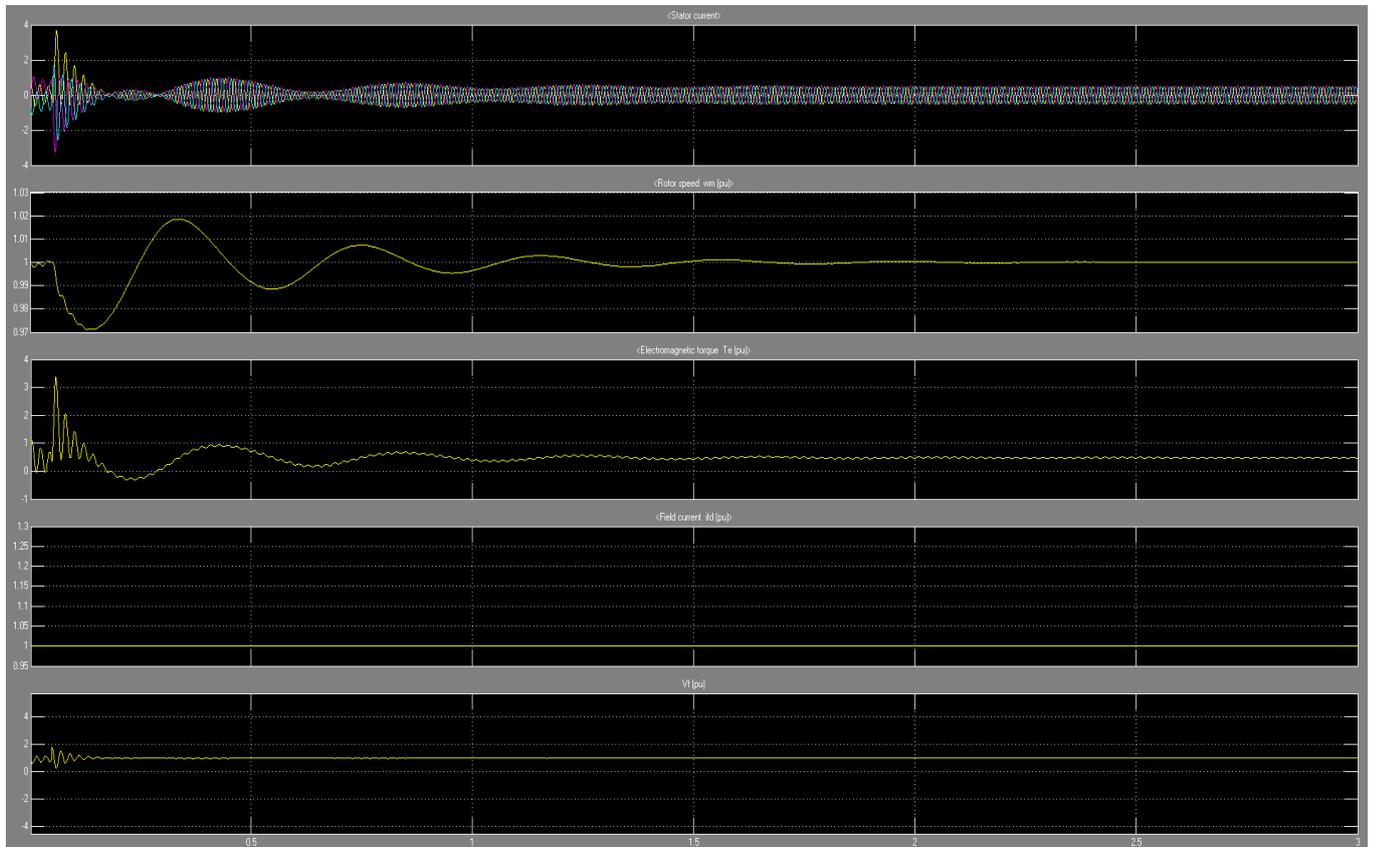


Рисунок 2.9 – Переходные характеристики в системе управления тока возбуждения

При возникновении коротких замыканий, коммутации нагрузок, перерыва питания и т. д., в СД возникают переходные процессы, в результате которых, он будет перегружен как по электромагнитному моменту, так и по мощности, что негативно отражается на долговечности электропривода [21]. Поэтому с целью уменьшения неблагоприятного влияния этих процессов производить синтез регуляторов необходимо по критерию максимального быстродействия:

$$t_p = t_{min}$$

2.4.2 Синхронный электродвигатель с обратной связью по реактивной мощности

Структурная схема системы регулирования с обратной связью по реактивной мощности СД [94-95] представлена на рисунке 2.10, и её реализация в MATLAB Simulink представлена на рисунке 2.11.

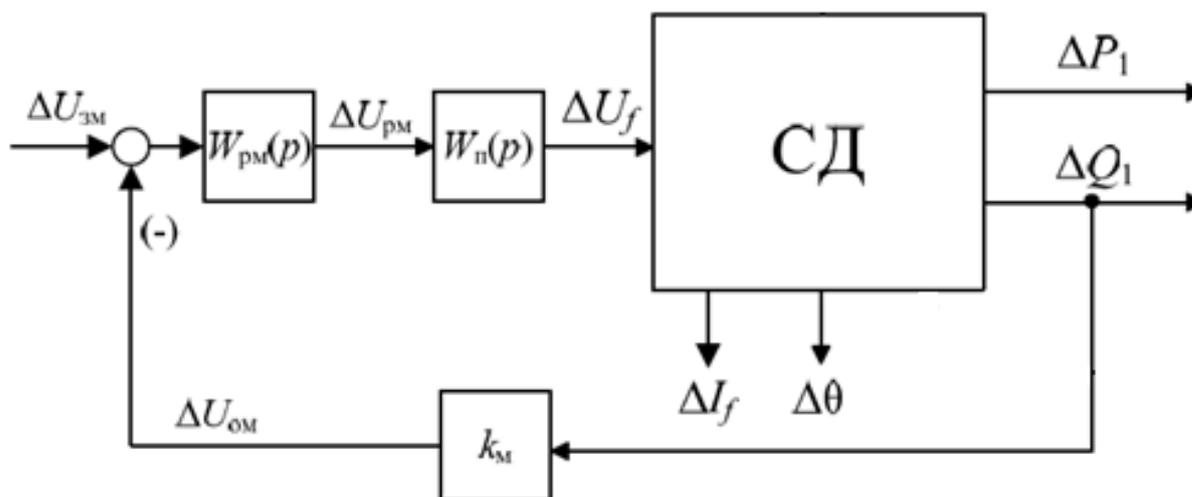


Рисунок 2.10 – Структурная схема контура регулирования реактивной мощности

В состав структурной схемы входят следующие элементы: - блок синхронного двигателя; - тиристорный возбудитель $W_{п}(p)$ с коэффициентом усиления 30 и постоянной времени равной 0,01; - регулятор реактивной мощности $W_{рм}(p)$ с реализацией И-регулятора; датчик тока возбуждения k_T .

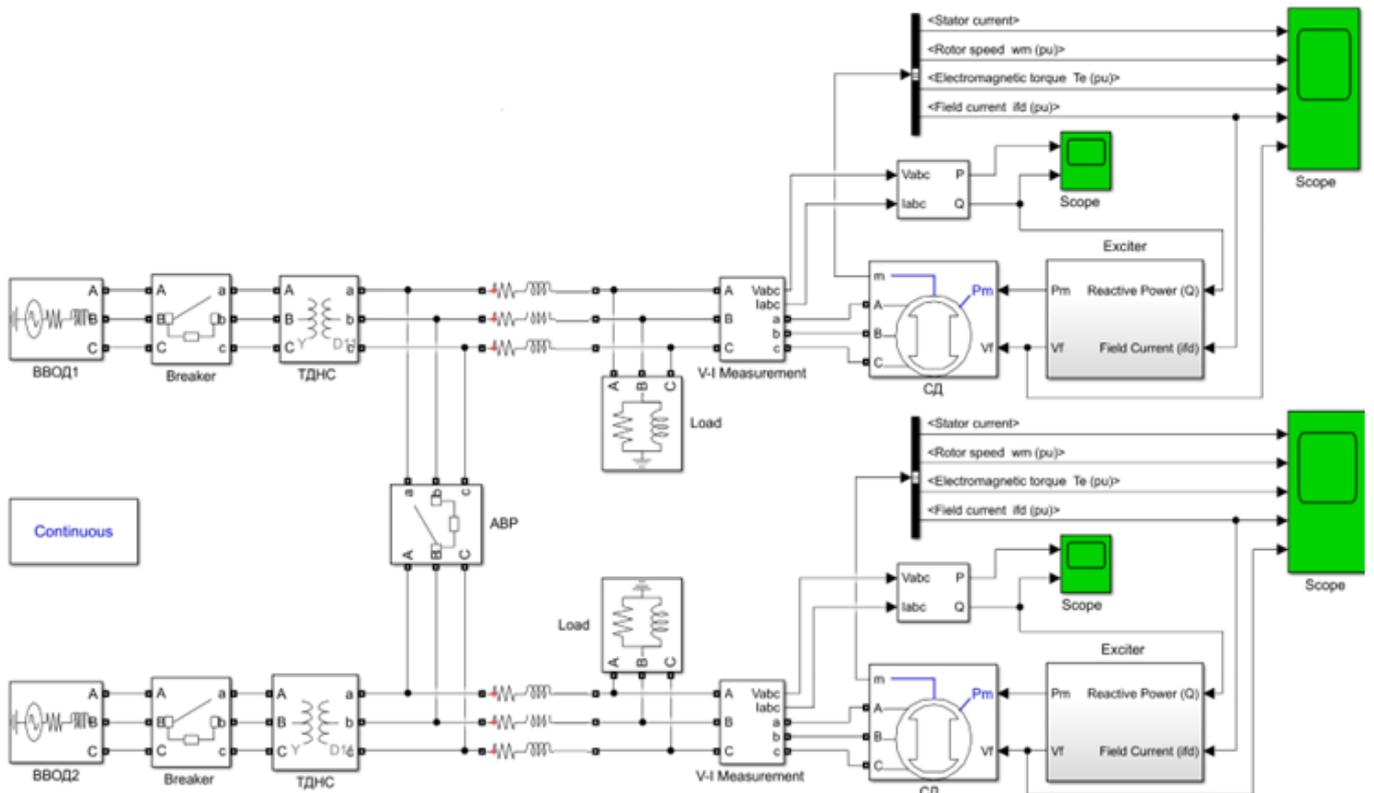


Рисунок 2.11 – Модель системы электроснабжения с синхронными двигателями, содержащими контуры регулирования реактивной мощности

Переходная характеристика контура по управляющему воздействию представлена на рисунке 2.12.

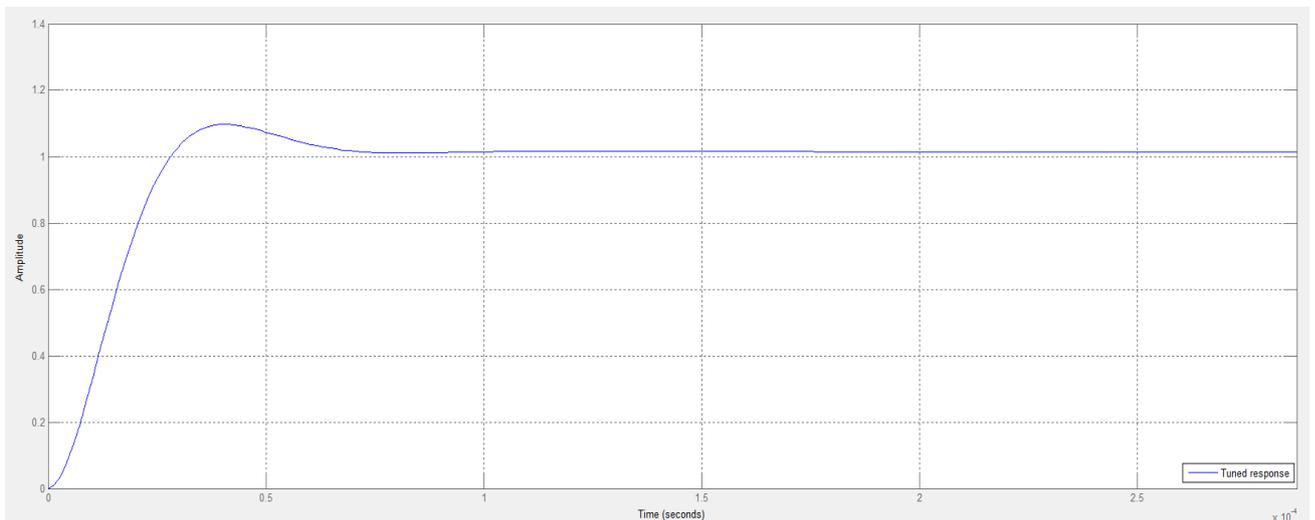


Рисунок 2.12 – Переходная характеристика по управляющему воздействию

Переходные процессы: ток статора - ΔI_s , скорость ротора - ΔW_m , электромагнитный момент - ΔT_e , ток возбуждения - ΔI_{fd} и напряжение возбуждения - ΔV_f при $t = 3$ сек представлены на рисунке 2.13.

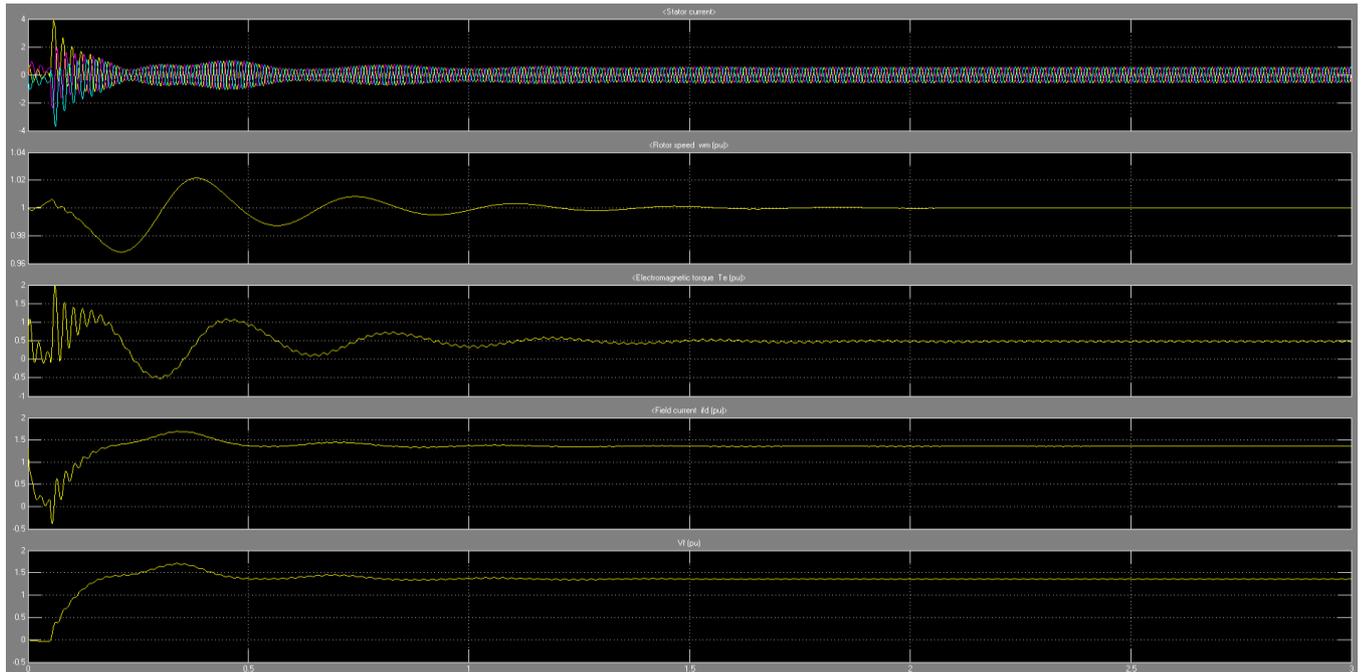


Рисунок 2.13. Переходные характеристики в системе управления реактивной мощностью

2.4.3 Синхронный электродвигатель с обратными связями по току возбуждения и реактивной мощности

Структурная схема системы управления с обратной связью по току возбуждения и реактивной мощности СД [94-95] выполнена двухконтурной с подчиненным регулированием координат и представлена на рисунке 2.14., и её реализация в MATLAB Simulink представлена на рисунке 2.15. Внутренним контуром является контур регулирования тока возбуждения, а внешним контуром является контур регулирования реактивной мощности СД.

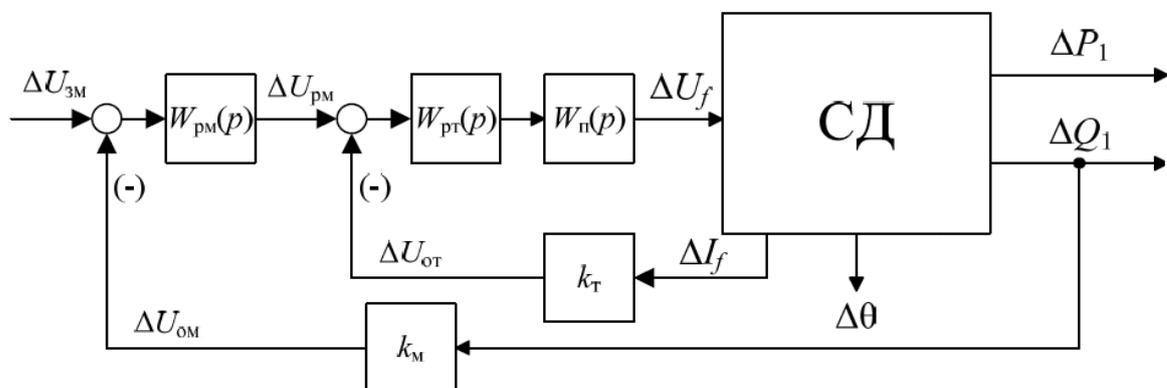


Рисунок 2.14 – Структурная схема контуров регулирования тока возбуждения и реактивной мощности

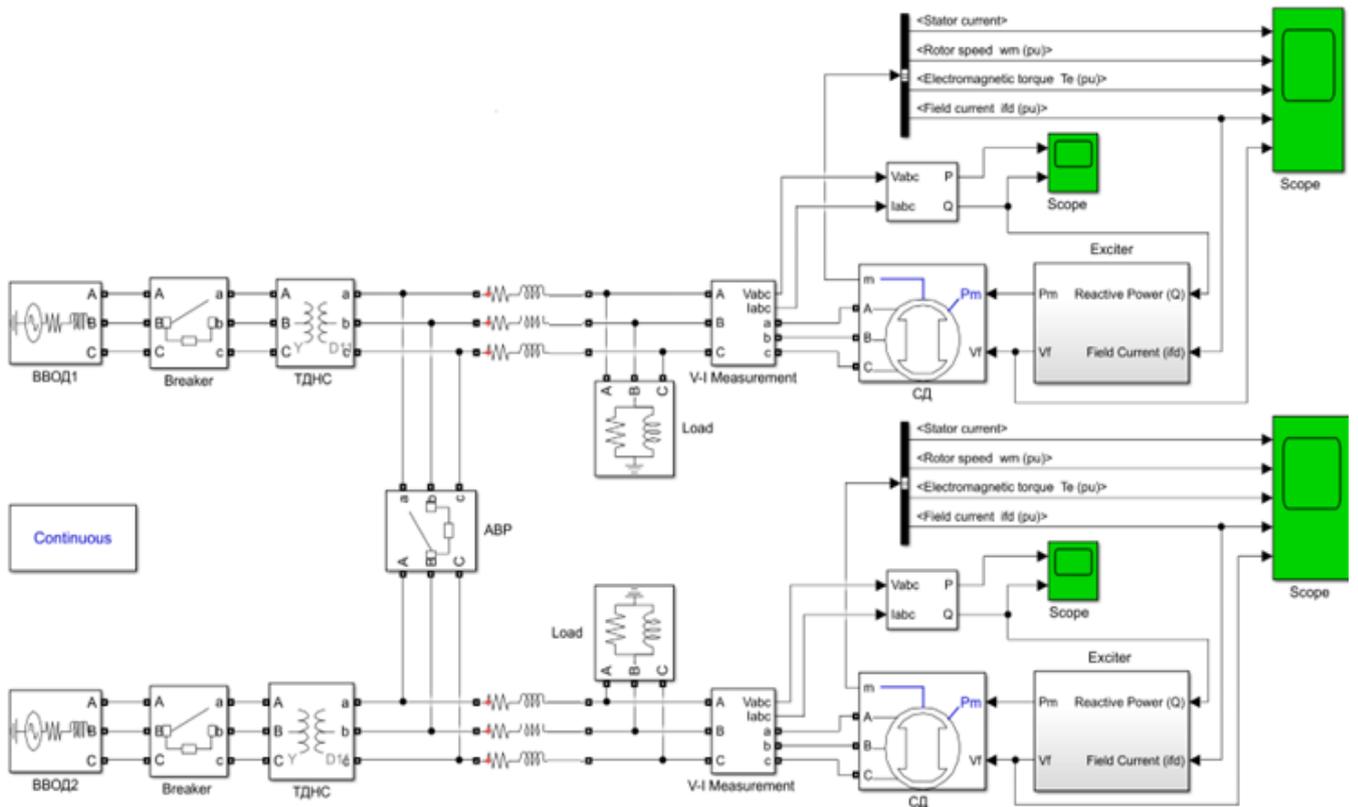


Рисунок 2.15 – Модель системы электроснабжения с синхронными двигателями, содержащими контуры регулирования тока возбуждения и реактивной мощности

Переходная характеристика контура по управляющему воздействию представлена на рисунке 2.16.

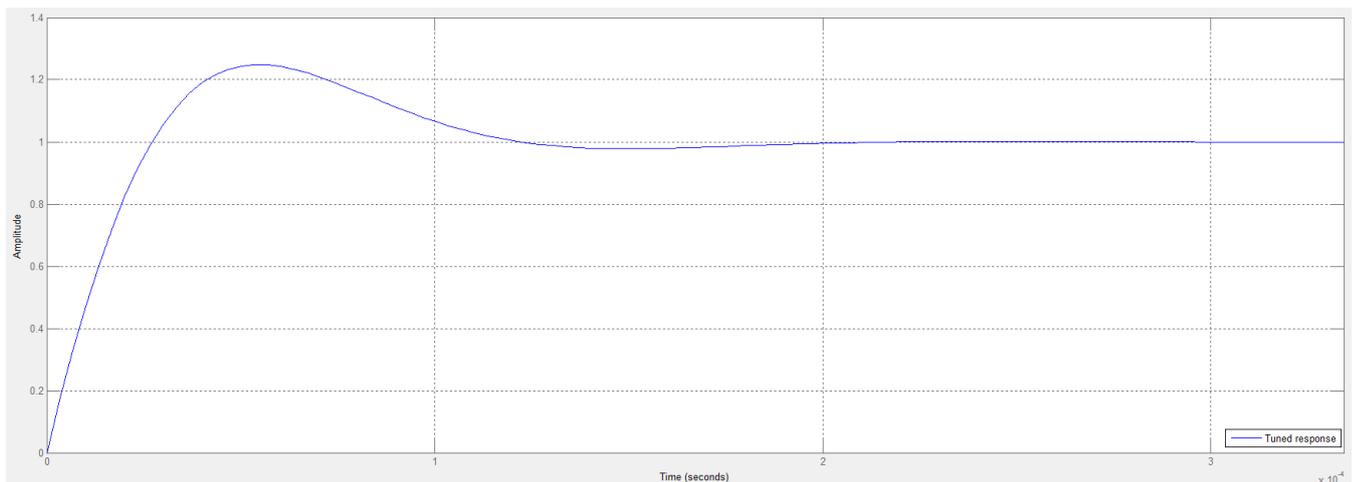


Рисунок 2.16 – Переходная характеристика по управляющему воздействию

Переходные процессы: ток статора - ΔI_s , скорость ротора - $\Delta \omega_m$, электромагнитный момент - ΔT_e , ток возбуждения - ΔI_{fd} и напряжение возбуждения - ΔV_f при $t = 3$ сек представлены на рисунке 2.17.

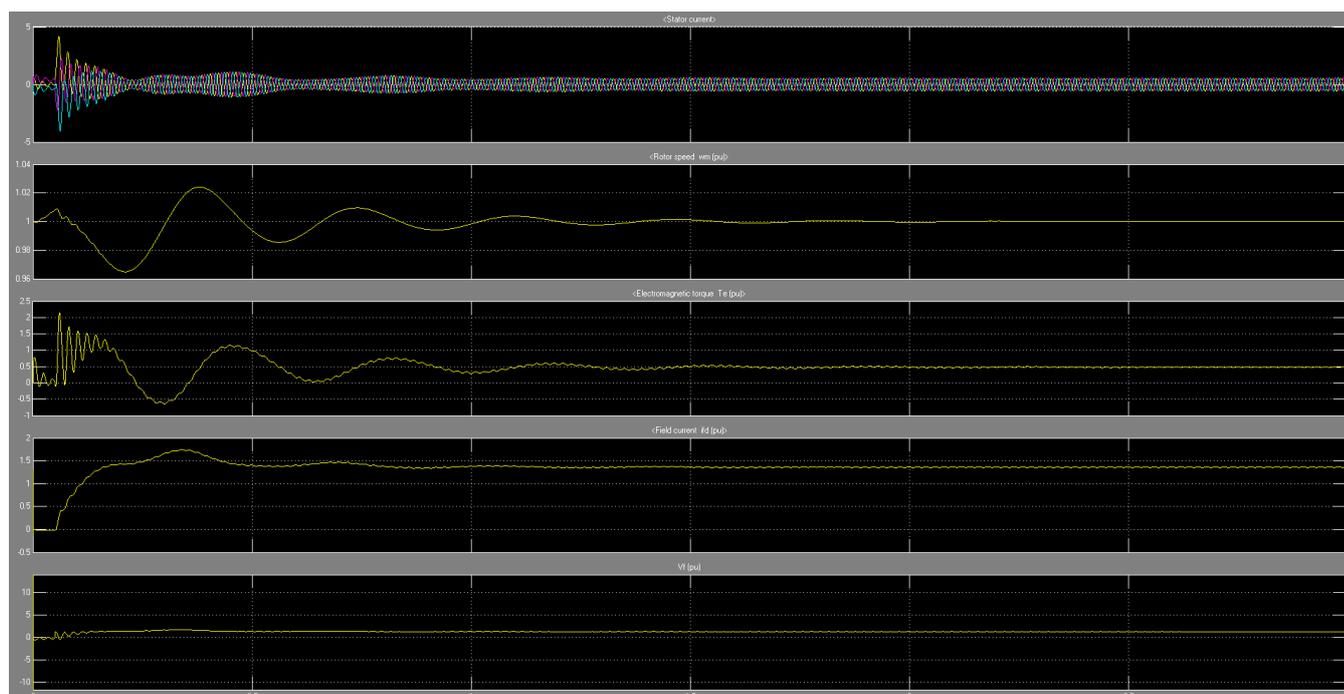


Рисунок 2.17 – Переходные характеристики в системе управления током возбуждения и реактивной мощности

Из сравнения динамических характеристик одноконтурной и двухконтурной системы АРВ можно сделать вывод, что несмотря на большую простоту одноконтурной системы управления и соизмеримость параметров их переходных характеристик, более целесообразны двухконтурные варианты, так как значительно проще ограничивать величину тока возбуждения СД.

2.4.4 Реализация асинхронного пуска синхронного электродвигателя

Для реализации процесса пуска СД в модели реализован асинхронный пуск. При этом методе обмотку возбуждения замыкают на гасящий резистор, сопротивление которого в несколько раз выше активного сопротивления обмотки возбуждения. После разгона ротора до подсинхронной частоты обмотку возбуждения отключают от гасящего резистора и подключают к источнику постоянного тока. Постоянный ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает синхронизирующий момент, который втягивает ротор в синхронизм. Модель с учетом этих особенностей приведена на рисунке 2.18.

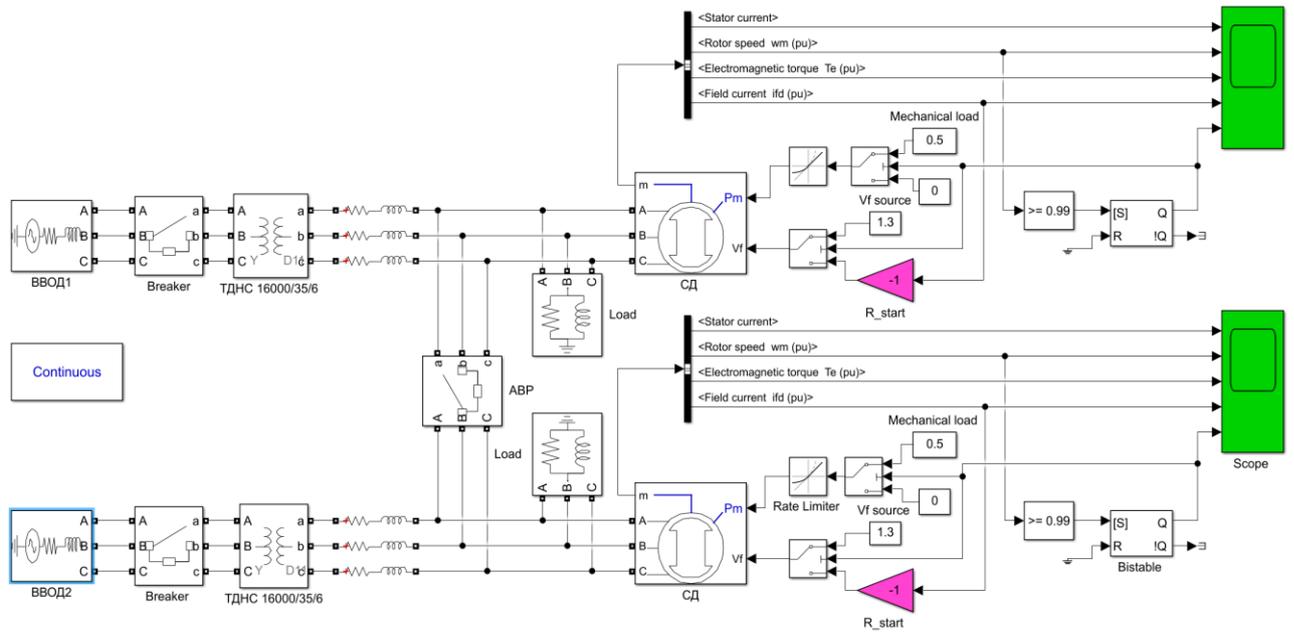


Рисунок 2.18 – Модель системы электроснабжения с асинхронным пуском

В состав модели входят следующие элементы: - *Rate Limiter* является блоком ограничения скорости изменения сигнала и необходим для реализации асинхронного пуска СД; - резисторы, подключаемые к обмотке возбуждения СД для реализации асинхронного пуска СД, представлены элементами *R Start*.

Переходные процессы при асинхронном пуске и вхождении в синхронизм: ток статора - ΔI_s , скорость ротора - $\Delta \omega_m$, электромагнитный момент - ΔT_e , ток возбуждения - ΔI_{fd} и напряжение возбуждения - ΔV_f при $t = 3$ сек представлены на рисунке 2.19.

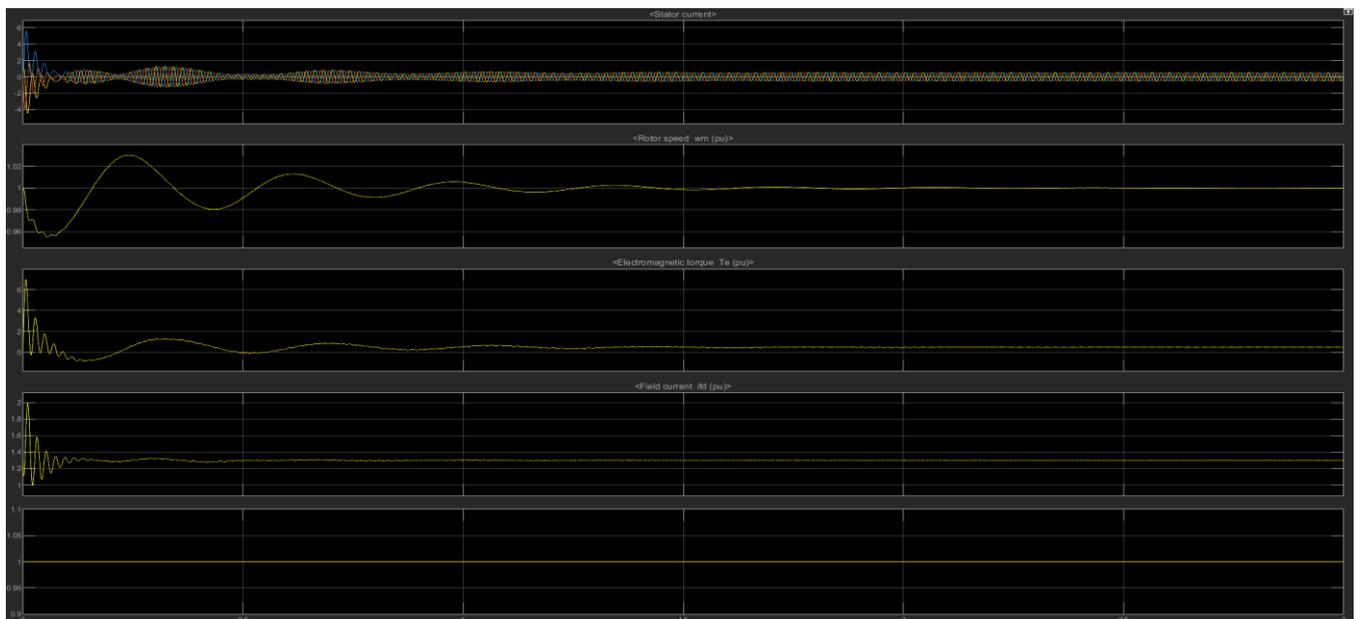


Рисунок 2.19 – Переходные характеристики для асинхронного пуска

2.5. Выводы по второй главе

Разработаны модели электроснабжения промышленных предприятий, включающие:

1. Модель синхронного двигателя на базе модели MatLab (Simulink).
2. Модели источников питания, линии электропередачи, трансформаторов, необходимых для полноценного функционирования модели.
3. Модель синхронного двигателя с асинхронным пуском.
4. Модели систем возбуждения СД содержащие регуляторы по току возбуждения и реактивной мощности с реализацией ПИД, ПИ, И – регуляторов.

Выполнен анализ, показывающий возможность применения разработанной модели для моделирования динамических режимов СД.

Модель реализована с учетом существующих подходов к анализу динамических процессов, происходящих в системе электроснабжения промышленных предприятий.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ САМОЗАПУСКА СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СЛУЧАЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ПЕРЕРЫВА ПИТАНИЯ

3.1. Математическая модель системы электроснабжения промышленного предприятия в случае кратковременного снижения напряжения

Разработанная модель СЭС промышленного предприятия в программной среде Matlab Simulink, учитывающая кратковременное снижение напряжения, приведена на рисунке 3.1. Исследование самозапуска СД рассмотрено на примере аварийного отключения одного из источников СЭС вследствие аварии на подстанции (*ВВОД 2*), и переводе всей нагрузки на другой ввод (*ВВОД 1*). Подробное описание модели СЭС и реализованных элементов рассмотрено во второй главе.

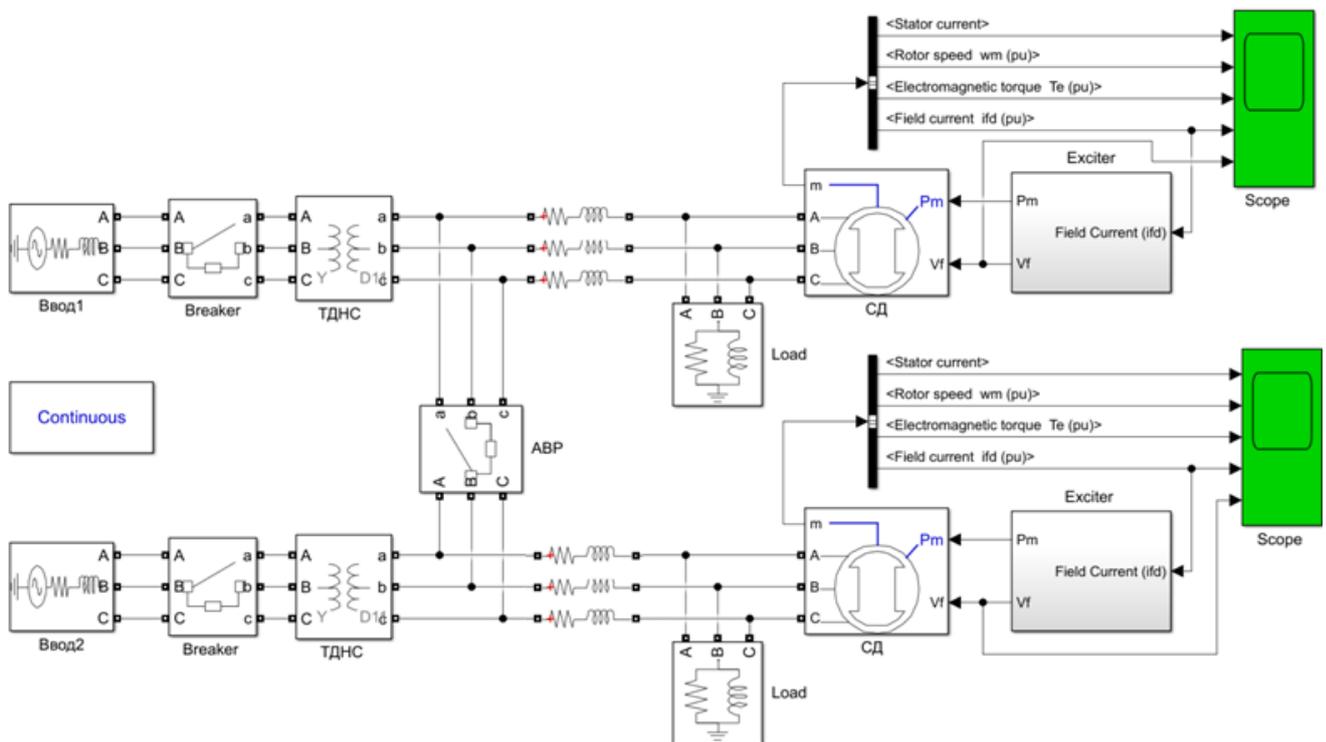


Рисунок 3.1 – Обобщенная модель системы электроснабжения предприятия

3.2. Моделирование кратковременного перерыва питания системы электроснабжения

Из [80] известно, что устойчивость СД зависит от длительности перерыва питания. В общем случае расчеты для реальных двигателей показывают, что

допустимое время перерыва питания, при котором обеспечивается 100%-ная вероятность успешной ресинхронизации не превышает 0,3 секунды.

Для оценки возможности самозапуска, границы диапазона времени отключения приняты от 0,1 сек. (минимальное время отключения с учетом времени действия РЗА) до 0,5 сек. (время восстановления напряжения на двигателе средствами РЗА).

В случае кратковременного перерыва питания частота вращения ротора изменяется незначительно. Поэтому принято допущение о постоянстве механической нагрузки на валу электродвигателя при исследовании переходных процессов в этом режиме. Величина нагрузки на валу принята равной номинальной.

При проведении экспериментов исследовалось влияние на процесс самозапуска СД следующих факторов и их значений:

- напряжение питания СЭС $U_{\text{ном}}$: 35 и 110 кВ;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{\text{кз}}$: 390, 790 и 1590 МВ · А;
- полная мощность СД $S_{\text{сд}}$: 880 кВА (СДВ-15-39-10), 2222 кВА (СДВ-16-64-12);
- время восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$: 0,1, 0,3 и 0,5 секунд.

При проведении экспериментов исследовалось влияние на переходные процессы самозапуска следующих структур систем АРВ:

- отсутствие системы автоматического регулирования (АП);
- одноконтурная система автоматического регулирования тока возбуждения синхронного электродвигателя (РТВ);
- двухконтурная система автоматического регулирования реактивной мощности синхронного электродвигателя (РРМ).

Были проведены следующие эксперименты:

1. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

2. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

3. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

4. Аварийное отключение одного из источников питания и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

При построении графиков переходных процессов для удобства их анализа все величины на графиках заданы в относительных единицах. За базисные значения приняты: ток статора $I_{\text{НОМ}} = 67$ А, скорость двигателя $n_{\text{НОМ}} = 250 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ (СДВ-15-39-10); ток статора $I_{\text{НОМ}} = 214$ А, скорость двигателя $n_{\text{НОМ}} = 300 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ (СДВ-16-64-12).

3.2.1. Моделирование самозапуска синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 35 кВ

Результаты экспериментов компьютерной модели для двигателя меньшей мощности СДВ-15-39-10 и номинального напряжения СЭС $U_{\text{НОМ}} = 35$ кВ приведены в таблице 3.1.

Для каждого сочетания варьируемых факторов в таблице 3.1 приведены значения времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$ и пиковое значение тока статора СД при перерыве питания $I_{\text{пик}}$, а также дана оценка нарушению устойчивости (Нет/Да).

Таблица 3.1.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$
1	Перерыв питания	35	АП	0.1	390	Нет	1.87	1.2
2					790	Нет	1.94	
3					1590	Нет	2.01	
4				0.3	390	Нет	2.68	2.9
5					790	Нет	2.75	
6					1590	Нет	2.82	
7					0.5	390	Нет	

8					790	Нет	3.26	
9					1590	Нет	3.33	
10			РТВ	0.1	390	Нет	2.81	2.3
11					790	Нет	2.93	
12					1590	Нет	3.05	
13				0.3	390	Нет	3.37	5.6
14					790	Нет	3.49	
15					1590	Нет	3.57	
16			0.5	390	Да	-	-	
17				790	Да	-		
18				1590	Да	-		
19			РРМ	0.1	390	Нет	4.11	2.9
20					790	Нет	4.24	
21					1590	Нет	4.37	
22				0.3	390	Нет	4.68	5.5
23					790	Нет	4.75	
24					1590	Нет	4.82	
25				0.5	390	Да	-	-
26					790	Да	-	
27					1590	Да	-	

- 1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
3) – время восстановления напряжения, сек.
4) – мощность КЗ, МВА.
5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведенных в таблице 3.1, показывают, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 16%, а при увеличении времени до 0,5 сек. наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведенных в таблице 3.1, показывает, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 11%, а при увеличении времени до 0,5 сек. наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблицы 3.1 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 4% для всех типов АРВ.

На рисунках 3.2 и 3.3 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД в случае кратковременного перерыва питания для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,3$ с и 0,5 сек. На графиках приведены зависимости изменения частоты вращения ротора и тока статора от времени для следующих режимов: входение в синхронизм при пуске, номинальный режим работы СД, самозапуск СД в случае кратковременного перерыва питания, установившийся режим или выпадение двигателя из синхронизма.

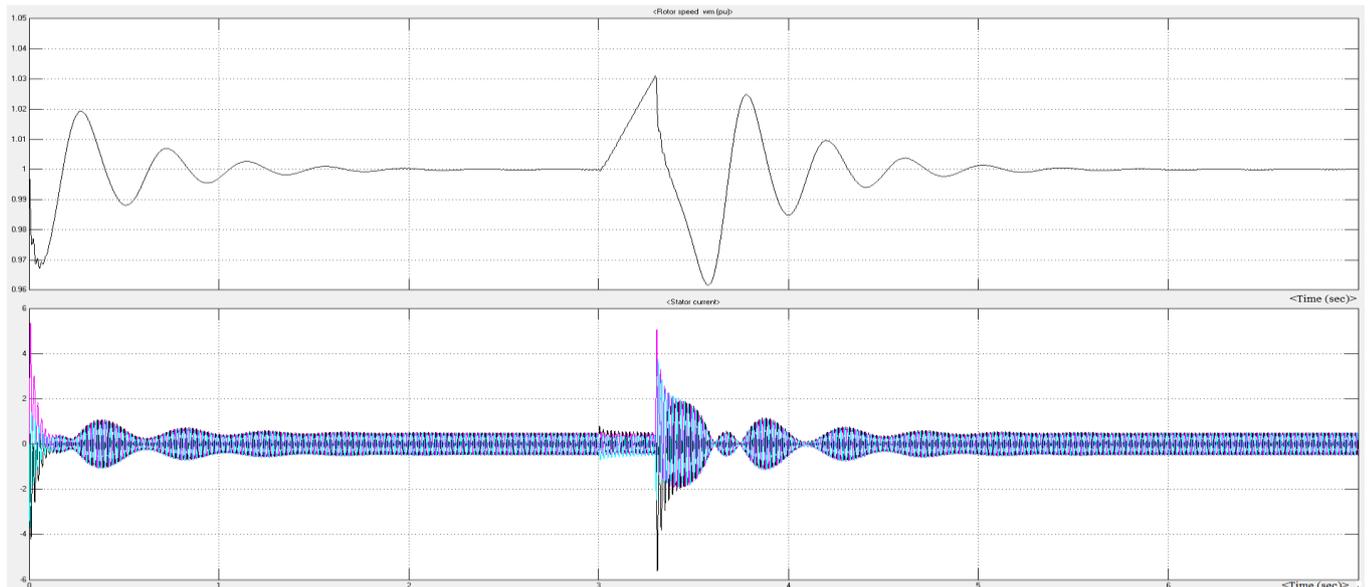


Рисунок 3.2 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,3$ сек

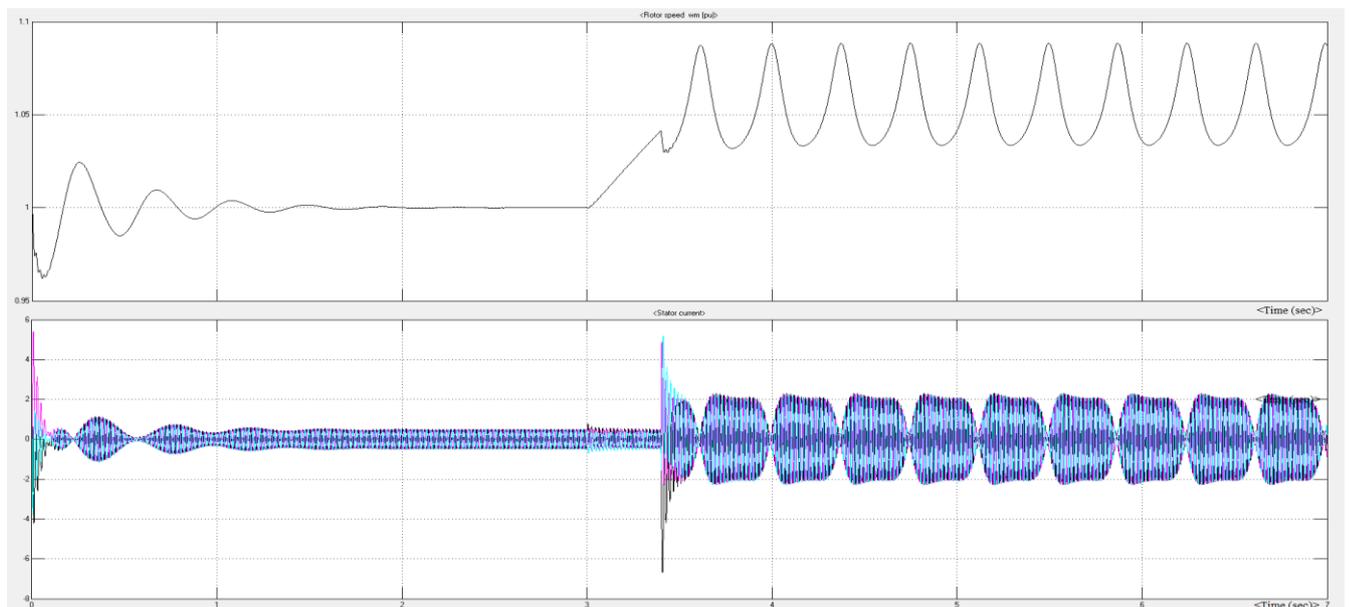


Рисунок 3.3 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,5$ сек

Анализ рисунка 3.2 показывает, что при снижении напряжения питания существенно возрастает ток статора (более чем в 5 раз по сравнению с номинальным), также имеет место незначительная просадка скорости СД. При увеличении времени восстановления напряжения до 0,5 сек., двигатель не выходит на номинальную скорость и выпадает из синхронизма независимо от заданной мощности КЗ (рисунок 3.3).

Результаты экспериментов компьютерной модели для двигателя большей мощности *СДВ-16-64-12* и номинального напряжения СЭС $U_{НОМ} = 35$ кВ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{НОМ}^1$	СВ ²	$T_{НОМ}^3$	$S_{КЗ}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{восст}^5$	$I_{пик}^6$	
1	Перерыв питания	35	АП	0.1	390	Нет	3.25	1.5	
2					790	Нет	3.31		
3					1590	Нет	3.43		
4				0.3	390	Нет	3.68	2	
5					790	Нет	3.74		
6					1590	Нет	3.82		
7				0.5	390	Нет	4.25	3	
8					790	Нет	4.36		
9					1590	Нет	4.43		
10			РТВ	35	0.1	390	Нет	2.07	3.5
11						790	Нет	2.18	
12						1590	Нет	2.22	
13					0.3	390	Нет	2.64	7
14						790	Нет	2.76	
15						1590	Нет	2.89	
16					0.5	390	Нет	3.01	4
17						790	Нет	3.18	
18						1590	Нет	3.24	
19			РРМ	35	0.1	390	Нет	2.17	3.3
20						790	Нет	2.26	
21						1590	Нет	2.31	
22					0.3	390	Нет	2.78	7.3
23						790	Нет	2.86	
24						1590	Нет	2.92	
25					0.5	390	Нет	3.17	3.5
26						790	Нет	3.28	
27						1590	Нет	3.32	

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.

2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).

3) – время восстановления напряжения, сек.

4) – мощность КЗ, МВА.

- 5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
 6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведённых в таблице 3.2, показывают, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 30%, но при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведённых в таблице 3.2, показывает, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 31%, но при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблицы 3.2 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 3% для всех типов АРВ.

На рисунке 3.4 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при наличии контура регулирования реактивной мощности для $T_{\text{НОМ}} = 0,3$ сек и $S_{\text{КЗ}} = 1590$ МВ · А.

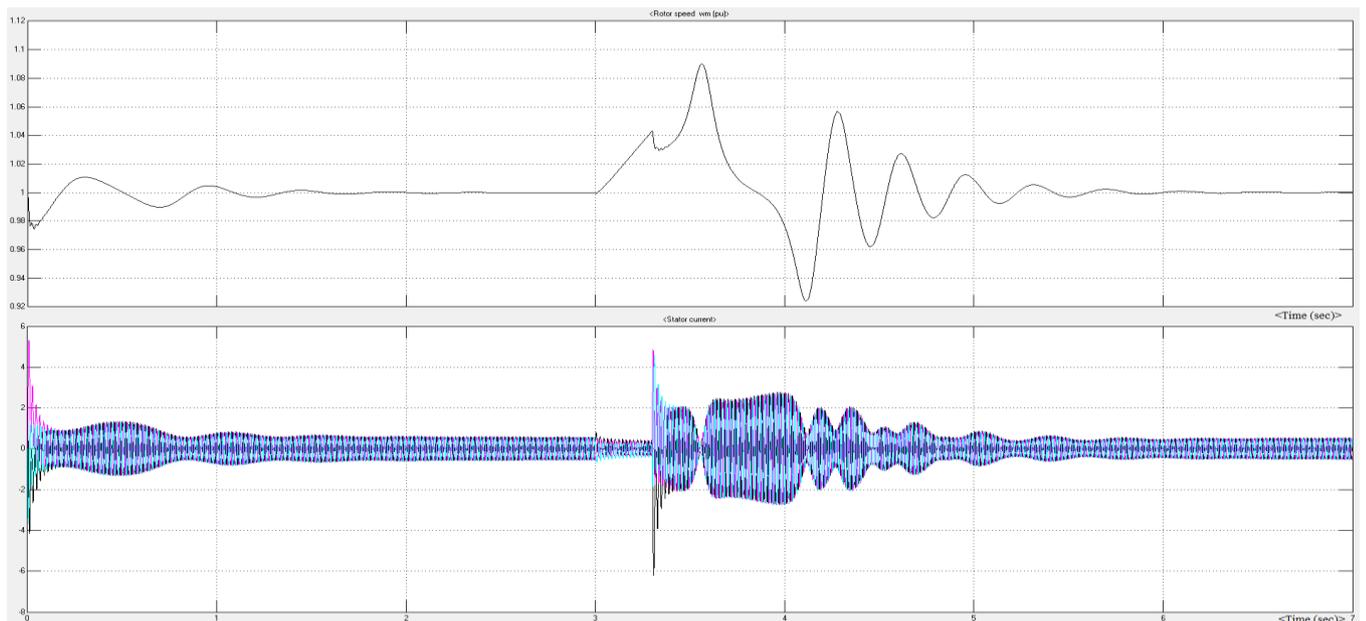


Рисунок 3.4 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае кратковременного перерыва питания для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,3$ сек

Анализ рисунка 3.4 показывает, что при просадке напряжения существенно возрастает ток статора, также имеет место незначительная просадка скорости СД. Численные значения просадки скорости СД в случае применения АРВ по реактивной мощности в среднем в 2 раза больше, чем с системой АРВ по току возбуждения.

На основе анализа результатов, приведённых в таблицах 3.1 и 3.2, сделаны следующие выводы:

1. Отсутствие системы АРВ:

– При увеличении времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. нарушение устойчивости отсутствует;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению пикового значения тока статора при перерыве питания $I_{\text{пик}}$;

– Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;

– Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора при перерыве питания $I_{\text{пик}}$.

2. Наличие АРВ по току возбуждения и реактивной мощности:

– При увеличении времени восстановления напряжения свыше 0,3 сек. нарушается устойчивость работы СД для двигателя меньшей мощности;

– При увеличении времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. нарушение устойчивости отсутствует для двигателя большей мощности;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;

- Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ для двигателя меньшей мощности;
- Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 сек. приводит к увеличению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$, а увеличение времени до 0,5 сек. приводит к уменьшению тока статора для двигателя большей мощности;
- Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;
- Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$;
- Включение АРВ по току возбуждения или реактивной мощности приводит к увеличению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$;
- Наличие двухконтурной АРВ по реактивной мощности приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$ в сравнение с одноконтурной АРВ по току возбуждения.

Сравнивая результаты, приведённые в таблицах 3.1 и 3.2 можно сделать вывод, что увеличение мощности СД и наличие АРВ приводит к повышению устойчивости самозапуска СД и уменьшению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$.

3.2.2. Зависимости самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания и напряжении внешнего электроснабжения 35 кВ

Получим зависимости времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ и пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ СД от времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$, характеризующие особенности самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания.

При этом влияние мощности КЗ на время восстановления нормального режима работы и пиковое значение тока статора СД не учитывается, так как

сделанный ранее анализ таблиц 3.1 и 3.2 показал, что изменение мощности КЗ незначительно влияет (менее 5–10%) на время восстановления нормального режима работы СД, и практически не влияет на результаты пиковых значений тока статора.

Для получения зависимостей используется трёхуровневый план проведения экспериментов для одной переменной при помощи программного пакета STATISTICA.

При использовании пакета STATISTICA принимается, что результаты машинных экспериментов получены на реальном объекте в условиях действия случайных помех, забывая об их фактическом происхождении. Тем самым можно применять стандартные статистические оценки искомых зависимостей и их адекватности машинному эксперименту.

Получим следующие варианты зависимостей:

1. Двигатель меньшей мощности, отсутствие АРВ;
2. Двигатель меньшей мощности, наличие АРВ по току возбуждения;
3. Двигатель меньшей мощности, наличие АРВ по реактивной мощности;
4. Двигатель большей мощности, отсутствие АРВ;
5. Двигатель большей мощности, наличие АРВ по току возбуждения;
6. Двигатель большей мощности, наличие АРВ по реактивной мощности.

С помощью данного программного пакета получены зависимости времени восстановления нормального режима работы ($T_{\text{восст}}$) и пикового значения тока статора в случае кратковременного перерыва питания ($I_{\text{пик}}$) СД от времени восстановления напряжения ($T_{\text{ном}}$) и значения коэффициента детерминации R^2 для рассматриваемых вариантов (таблица 3.3).

Для всех рассмотренных случаев коэффициент детерминации R^2 принимает значения равные или большие 0,9. Это означает, что предложенная модель адекватно описывает поведение выходной переменной при изменении входной переменной.

На основе полученных зависимостей (таблица 3.3) построены графики времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ (рисунок 3.5), и

пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ от времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$ (рисунок 3.6).

Таблица 3.3.

35кВ	СДВ-15-39-10	R^2	СДВ-16-64-12	R^2
АП	$T_{\text{восст}} = 1,66 + 3,3 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97	$T_{\text{восст}} = 3,05 + 2,54 \cdot T_{\text{ном}}$	0,96
РТВ	$T_{\text{восст}} = 2,66 + 2,733 \cdot T_{\text{ном}}$	0,9	$T_{\text{восст}} = 1,95 + 2,47 \cdot T_{\text{ном}}$	0,93
РРМ	$T_{\text{восст}} = 3,99 + 2,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,9	$T_{\text{восст}} = 2,03 + 2,53 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97
АП	$I_{\text{пик}} = 0,88 \cdot e^{(3,62 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,98	$I_{\text{пик}} = 1,237 \cdot e^{(1,73 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,96
РТВ	$I_{\text{пик}} = 1,47 \cdot e^{(4,45 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,95	$I_{\text{пик}} = -1,63 + 59 \cdot T_{\text{ном}} - 97,5 \cdot T_{\text{ном}}^2$	0,93
РРМ	$I_{\text{пик}} = 2,11 \cdot e^{(3,2 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,96	$I_{\text{пик}} = -1,69 + 50 \cdot T_{\text{ном}} - 81,3 \cdot T_{\text{ном}}^2$	0,94

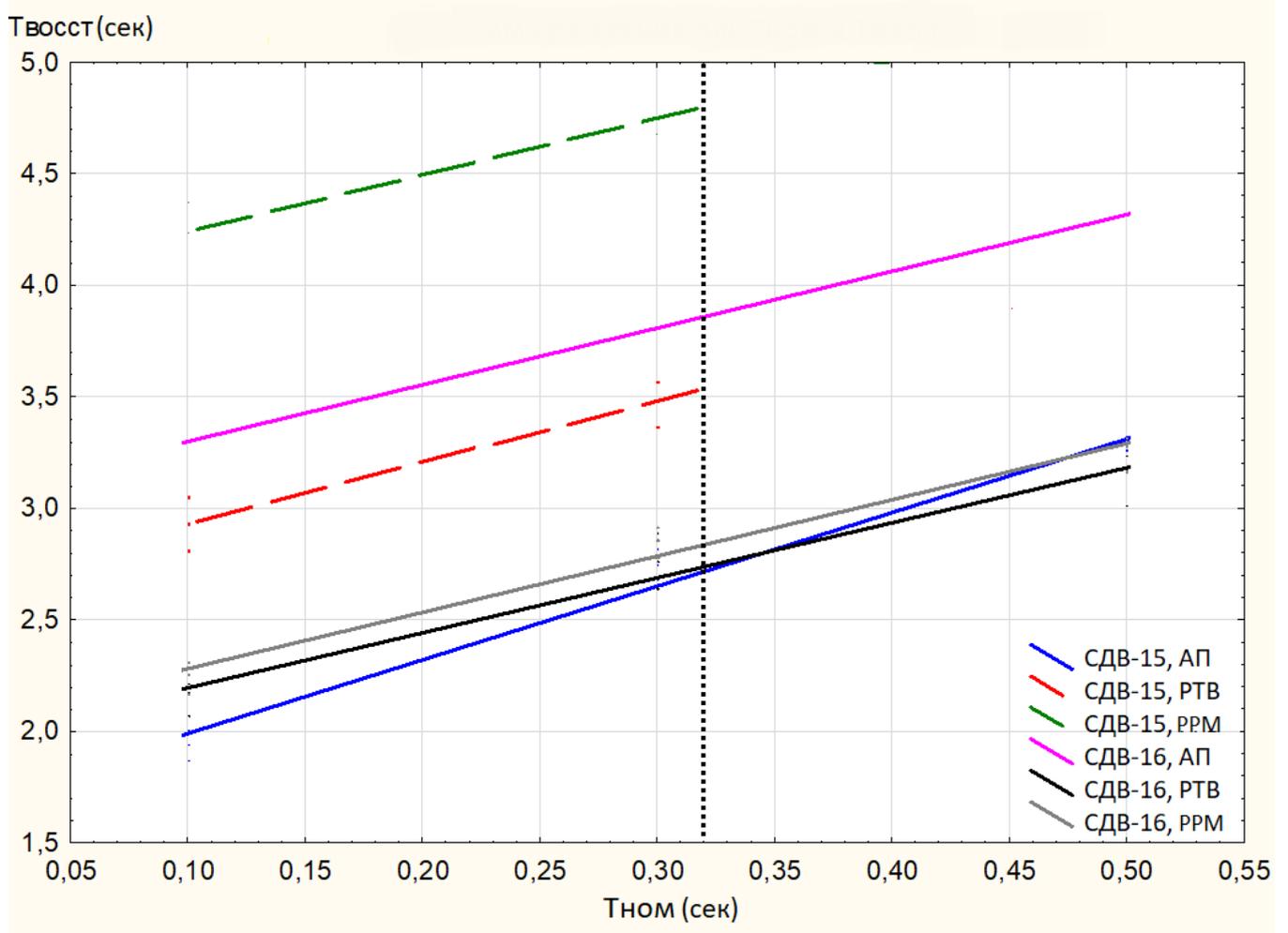


Рисунок 3.5 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени восстановления напряжения

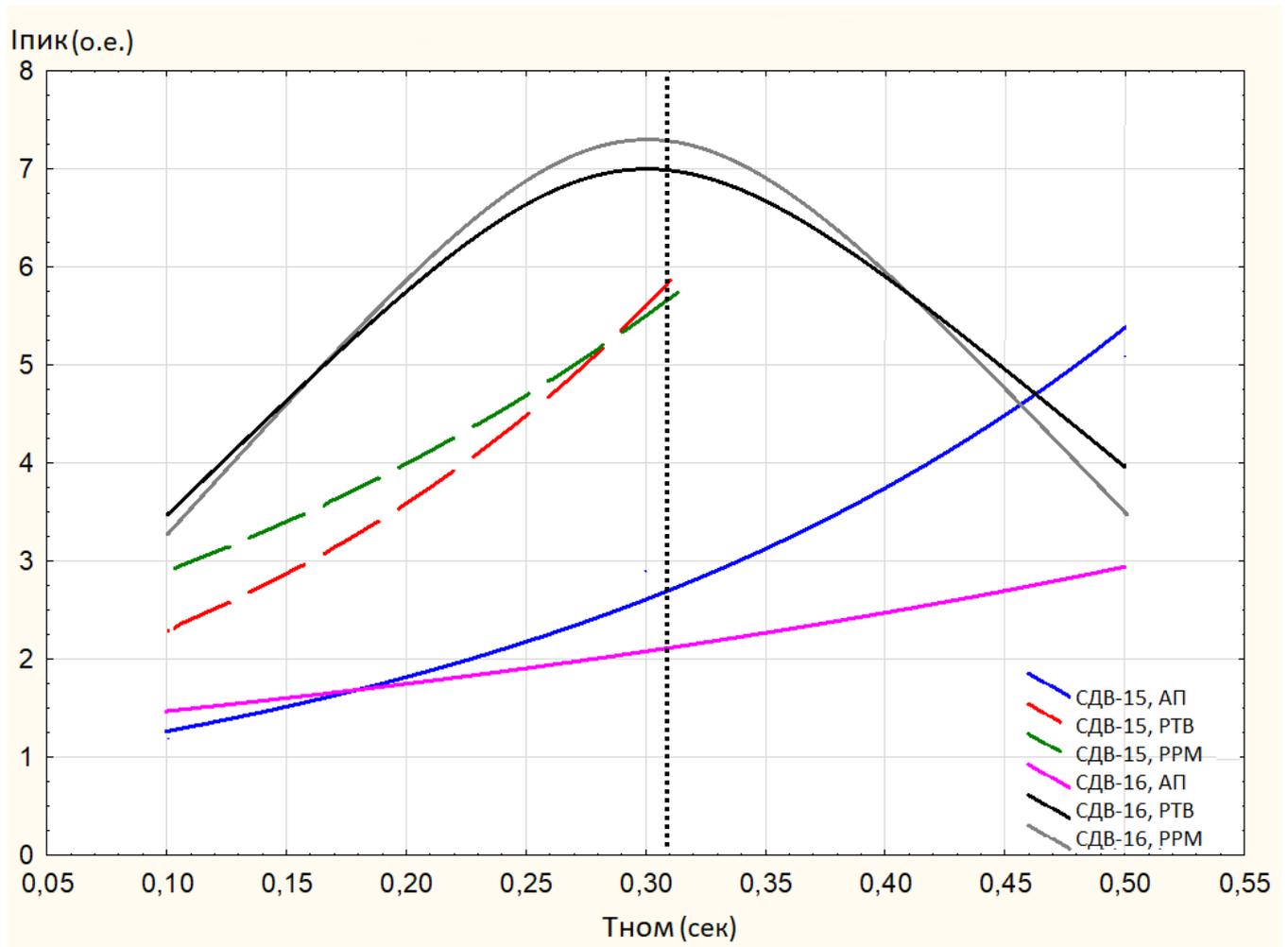


Рисунок 3.6 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени восстановления напряжения

На основании анализа зависимостей, приведённых в таблице 3.3, и графических зависимостей рисунков 3.5 и 3.6, можно сделать следующие выводы:

– независимо от мощности СД и отсутствии АРВ, нарушение устойчивости в режиме самозапуска отсутствует. Однако время восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ с увеличением мощности СД возрастает;

– при включении АРВ и увеличении времени $T_{\text{ном}}$ устойчивость в режиме самозапуска нарушается при $T_{\text{ном}}$ больше 0,31 сек. для двигателя меньшей мощности;

– при увеличении времени $T_{\text{ном}}$ и увеличении мощности СД включение АРВ не приводит к нарушению устойчивости. При этом время $T_{\text{восст}}$ при увеличении мощности СД уменьшается по сравнению со случаем отсутствия регуляторов;

– при отсутствии АРВ, независимо от мощности СД, с увеличением времени $T_{\text{ном}}$ происходит монотонное увеличение пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$. При этом с ростом мощности СД при перерыве питания больше 0,31 секунд пиковое значение тока $I_{\text{пик}}$ уменьшается по сравнению со случаем СД меньшей мощности;

– при любом АРВ маломощного двигателя ток $I_{\text{пик}}$ существенно возрастает по сравнению с отсутствием АРВ. Отсюда следует вывод, что в режиме самозапуска, с целью уменьшения тока $I_{\text{пик}}$, необходимо отключение регуляторов.

Зависимости, приведённые в таблице 3.3 и графики на рисунках 3.5 и 3.6 позволяют определить допустимые времена срабатывания релейной защиты, при которых будет иметь место устойчивый режим самозапуска СД при отсутствии или наличии АРВ и одновременной работе нескольких СД различной мощности для напряжения СЭС 35 кВ.

3.2.3. Моделирование самозапуска синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 110 кВ

Результаты компьютерных экспериментов для двигателя меньшей мощности СДВ-15-39-10 и номинального напряжения СЭС $U_{\text{ном}} = 110$ кВ приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{ном}}^1$	СВ ²	$T_{\text{ном}}^3$	$S_{\text{кз}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$	
1	Перерыв питания	110	АП	0.1	390	Нет	2.01	1.3	
2					790	Нет	2.14		
3					1590	Нет	2.27		
4				0.3	390	Нет	2.72	3	
5					790	Нет	2.85		
6					1590	Нет	2.98		
7				0.5	390	Нет	3.43	5.2	
8					790	Нет	3.56		
9					1590	Нет	3.69		
10			РТВ	110	0.1	390	Нет	3.08	2.5
11						790	Нет	3.13	
12						1590	Нет	3.21	
13					0.3	390	Нет	3.46	5.8
14						790	Нет	3.52	
15						1590	Нет	3.61	
16					0.5	390	Да	-	-
17						790	Да	-	

18					1590	Да	-	
19			РРМ	0.1	390	Нет	4.2	3,1
20		790			Нет	4.29		
21		1590			Нет	4.4		
22				0.3	390	Нет	4.72	5.6
23		790			Нет	4.81		
24		1590			Нет	4.89		
25				0.5	390	Да	-	-
26		790			Да	-		
27		1590			Да	-		

- 1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
- 2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
- 3) – время восстановления напряжения, сек.
- 4) – мощность КЗ, МВА.
- 5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
- 6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведенных в таблице 3.4, показывают, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 11%, а при увеличении времени до 0,5 сек. наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведенных в таблице 3.4, показывает, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 10%, а при увеличении времени до 0,5 сек. наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблицы 3.4 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 2% для всех типов АРВ.

Сравнение пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ и времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$ в таблицах 3.1 и 3.4 показывает, что переход с напряжения 35 кВ на 110 кВ при одинаковой мощности электродвигателя приводит к незначительному (5–8%) увеличению $I_{\text{пик}}$ и $T_{\text{восст}}$.

На рисунках 3.7 и 3.8 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД в случае кратковременного перерыва питания для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ с}$ и $0,5 \text{ сек}$.

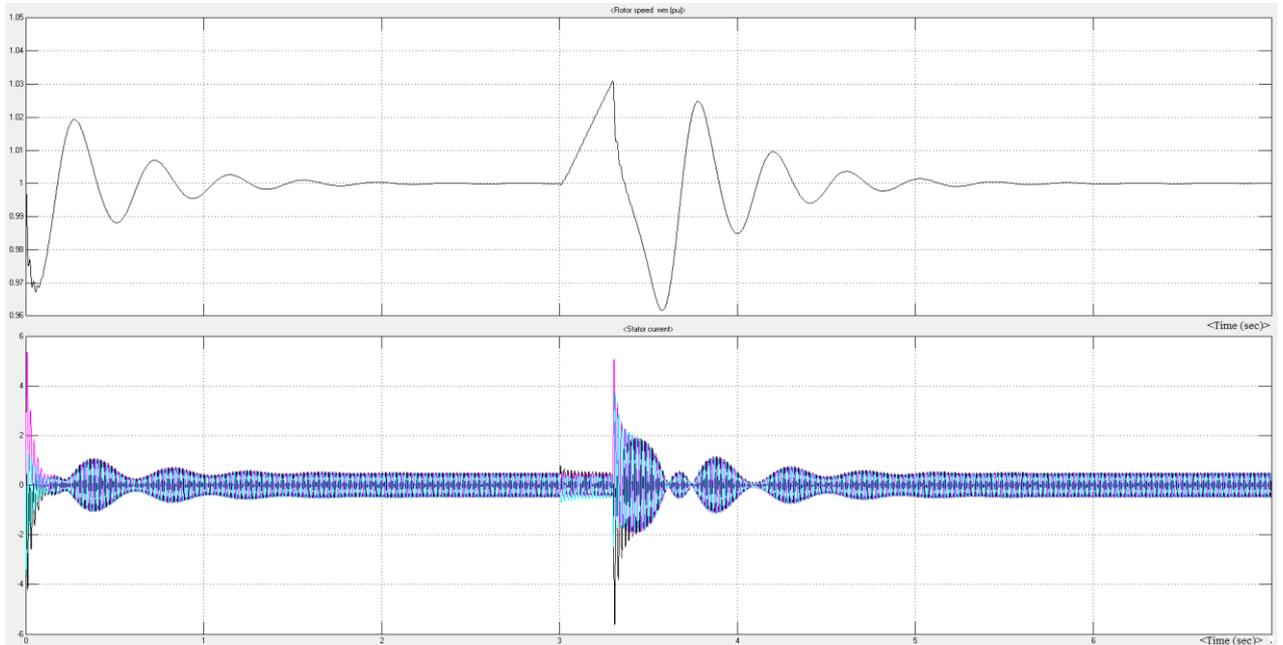


Рисунок 3.7 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

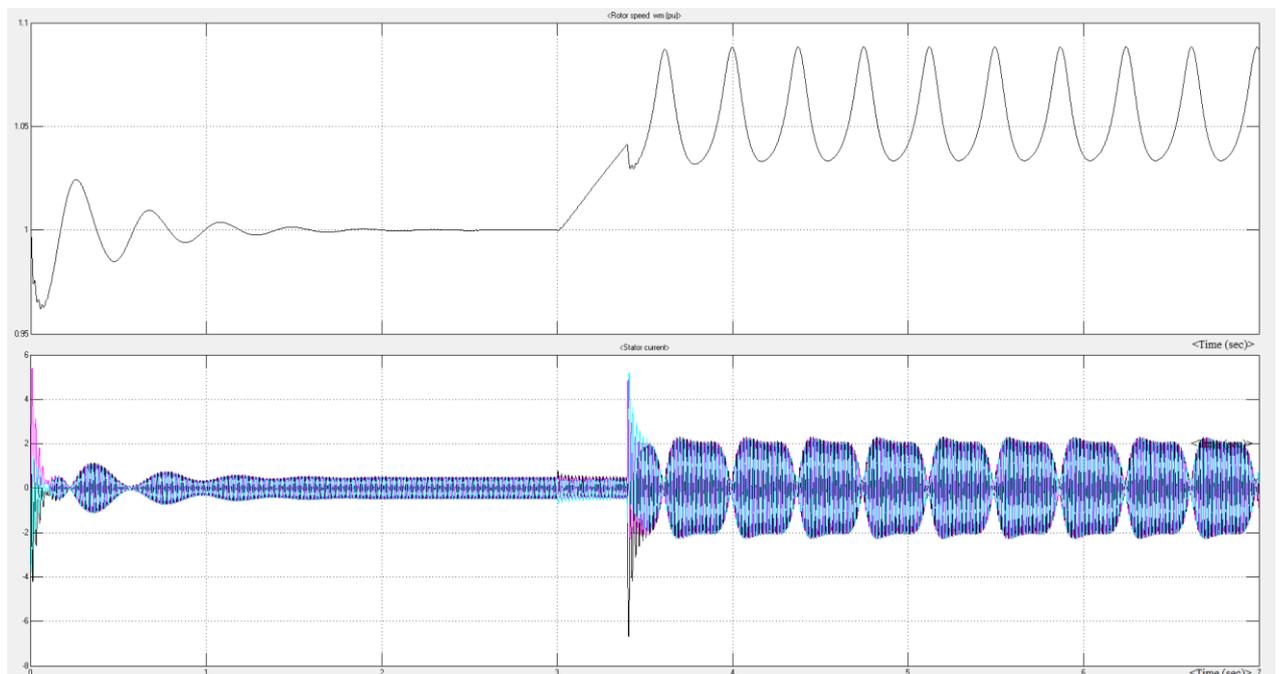


Рисунок 3.8 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора для времени восстановления напряжения $T_{\text{НОМ}} = 0,5 \text{ сек}$

Анализ рисунка 3.7 показывает, что при просадке напряжения существенно возрастает ток статора, а также имеет место незначительная просадка скорости СД. При увеличении времени восстановления напряжения до 0,5 сек., двигатель не

выходит на номинальную скорость и выпадает из синхронизма независимо от заданной мощности КЗ (рисунок 3.8).

Результаты экспериментов для двигателя большей мощности *СДВ-16-64-12* и номинального напряжения внешнего электроснабжения $U_{НОМ} = 110$ кВ приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{НОМ}^1$	СВ ²	$T_{НОМ}^3$	$S_{КЗ}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{ВОССТ}^5$	$I_{ПИК}^6$
1	Перерыв питания	110	АП	0.1	390	Нет	3.41	1.7
2					790	Нет	3.54	
3					1590	Нет	3.67	
4				0.3	390	Нет	3.82	2.1
5					790	Нет	3.95	
6					1590	Нет	4.08	
7				0.5	390	Нет	4.23	3
8					790	Нет	4.46	
9					1590	Нет	4.59	
10			РТВ	0.1	390	Нет	2.21	3.5
11					790	Нет	2.32	
12					1590	Нет	2.43	
13				0.3	390	Нет	2.74	6.9
14					790	Нет	2.85	
15					1590	Нет	2.96	
16				0.5	390	Нет	3.15	4.2
17					790	Нет	3.25	
18					1590	Нет	3.35	
19			РРМ	0.1	390	Нет	2.25	3.5
20					790	Нет	2.35	
21					1590	Нет	2.45	
22				0.3	390	Нет	2.83	7.5
23					790	Нет	2.91	
24					1590	Нет	3	
25				0.5	390	Нет	3.2	3.6
26					790	Нет	3.3	
27					1590	Нет	3.4	

- 1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
- 2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
- 3) – время восстановления напряжения, сек.
- 4) – мощность КЗ, МВА.
- 5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
- 6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведенных в таблице 3.5, показывают, что с увеличением времени

восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 28%, но при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведенных в таблице 3.5, показывает, что с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 28%, но при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблицы 3.5 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 4% для всех типов АРВ.

На рисунке 3.9 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД в случае кратковременного перерыва питания для $T_{\text{ном}} = 0,3 \text{ с}$ и $S_{\text{кз}} = 1590 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

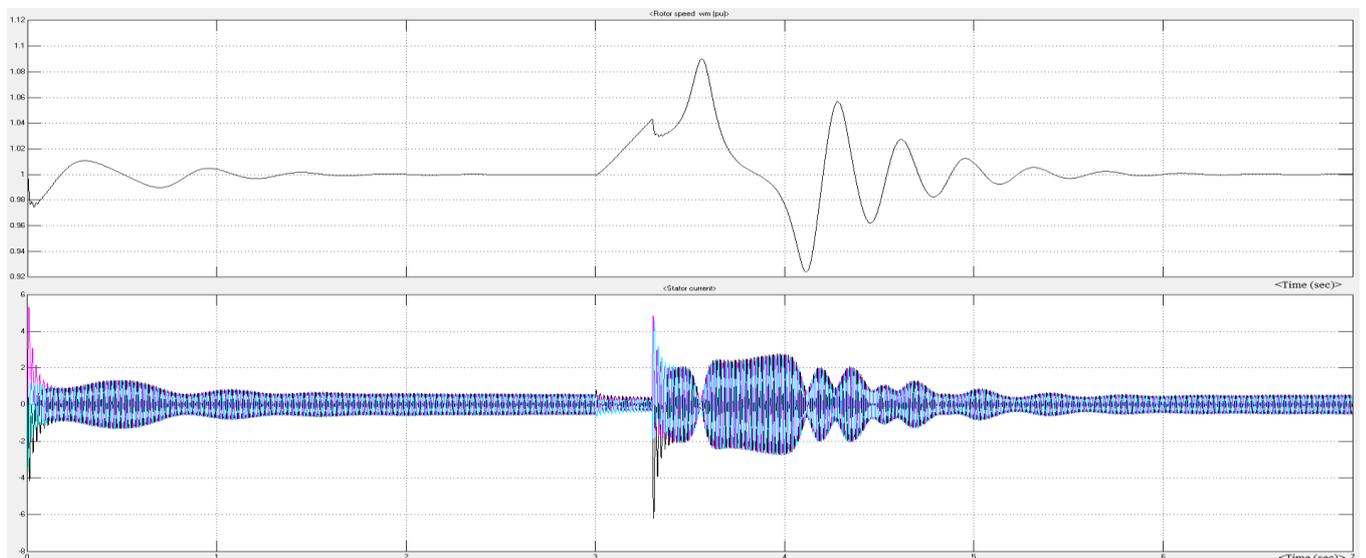


Рисунок 3.9 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае кратковременного перерыва питания для времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}} = 0,3 \text{ сек}$

Анализ рисунка 3.9 показывает, что при просадке напряжения питания существенно возрастает ток статора, также имеет место незначительная просадка скорости СД.

На основе анализа результатов, приведённых в таблицах 3.4 и 3.5, сделаны следующие выводы:

1. Отсутствие системы АРВ:

– При увеличении времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. нарушение устойчивости отсутствует;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению пикового значения тока статора в случае кратковременного перерыва питания $I_{\text{пик}}$;

– Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;

– Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора при перерыве питания $I_{\text{пик}}$.

2. Наличие АРВ по току возбуждения и реактивной мощности:

– При увеличении времени восстановления напряжения свыше 0,3 сек. нарушается устойчивость работы СД для двигателя меньшей мощности;

– При увеличении времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. нарушение устойчивости отсутствует для двигателя большей мощности;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{\text{восст}}$;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ для двигателя меньшей мощности;

– Увеличение времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 сек. приводит к увеличению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$, а увеличение времени до 0,5 сек. приводит к уменьшению тока статора для двигателя большей мощности;

– Увеличение мощности КЗ $S_{КЗ}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{восст}$;

– Изменение мощности КЗ $S_{КЗ}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора $I_{пик}$;

– Включение АРВ по току возбуждения или реактивной мощности приводит к увеличению пикового значения тока статора $I_{пик}$;

– Наличие двухконтурной АРВ по реактивной мощности приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{восст}$ в сравнение с одноконтурной АРВ по току возбуждения.

Сравнение пикового значения тока статора $I_{пик}$ и времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{восст}$ в таблицах 3.2 и 3.5 показывает, что переход с напряжения 35 кВ на 110 кВ при одинаковой мощности электродвигателя приводит к незначительному (5–8%) увеличению $I_{пик}$ и $T_{восст}$.

Сравнение результатов машинных экспериментов при напряжении 35 кВ и 110 кВ показывает, что устойчивость в режиме самозапуска при переходе от одного уровня напряжения к другому не меняется.

Сравнивая результаты таблиц 3.1, 3.2, 3.4 и 3.5, можно сделать вывод, что увеличение мощности СД при наличии АРВ по току возбуждения или реактивной мощности приводит к повышению устойчивости самозапуска и уменьшению времени выхода двигателя на номинальный режим работы после восстановления напряжения $T_{восст}$.

3.2.4. Зависимости самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания и напряжении внешнего электроснабжения 110 кВ

Аналогично параграфу 3.2.2, на основании результатов таблиц 3.4 и 3.5 получены зависимости и значения R^2 для двигателей *СДВ-15-39-10* и *СДВ-16-64-12* (таблица 3.6) при помощи программного пакета STATISTICA.

На основе полученных зависимостей (таблица 3.6) построены графики времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ от времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$ (рисунок 3.10), и пикового значения тока статора в случае кратковременного перерыва питания $I_{\text{пик}}$ от времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$ (рисунок 3.11).

Влияние мощности КЗ на время восстановления нормального режима работы и пиковое значение тока статора СД не учитывается.

Таблица 3.6.

110кВ	СДВ-15-39-10	R^2	СДВ-16-64-12	R^2
АП	$T_{\text{восст}} = 1,78 + 3,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97	$T_{\text{восст}} = 3,3 + 2,22 \cdot T_{\text{ном}}$	0,90
РТВ	$T_{\text{восст}} = 2,95 + 1,95 \cdot T_{\text{ном}}$	0,92	$T_{\text{восст}} = 2,11 + 2,32 \cdot T_{\text{ном}}$	0,94
РРМ	$T_{\text{восст}} = 4,04 + 2,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,92	$T_{\text{восст}} = 2,14 + 2,37 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95
АП	$I_{\text{пик}} = 0,96 \cdot e^{(3,46 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,99	$I_{\text{пик}} = 1,43 \cdot e^{(1,42 \cdot T_{\text{ном}})}$	0,95
РТВ	$I_{\text{пик}} = 1,64 \cdot e^{(4,21 \cdot T_{\text{ном}})}$	1,00	$I_{\text{пик}} = -0,49 + 47T_{\text{в}} - 76,3T_{\text{ном}}^2$	0,93
РРМ	$I_{\text{пик}} = 2,31 \cdot e^{(2,95 \cdot T_{\text{ном}})}$	1,00	$I_{\text{пик}} = -1,46 + 60T_{\text{в}} - 98,8T_{\text{ном}}^2$	0,94

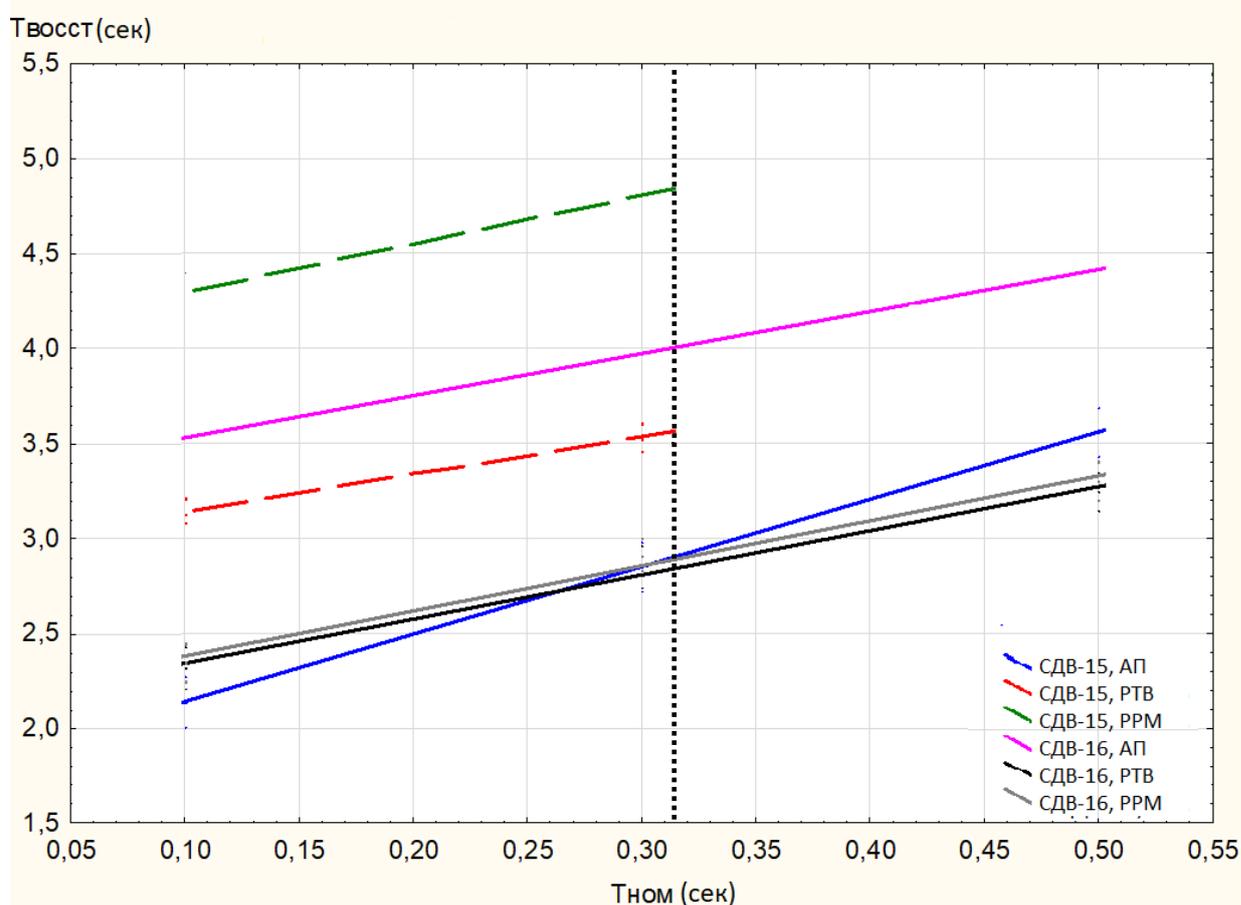


Рисунок 3.10 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени восстановления напряжения

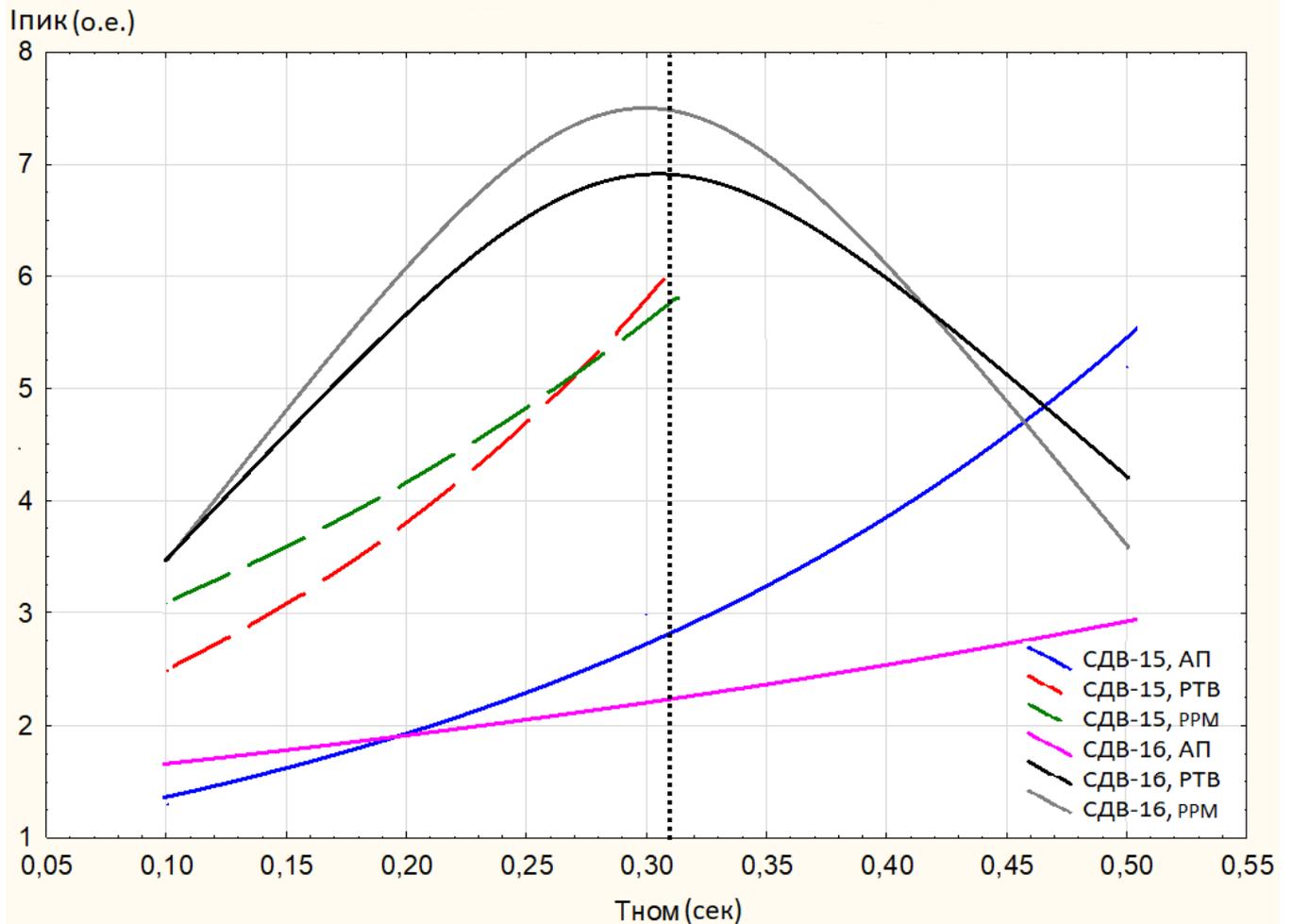


Рисунок 3.11 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени восстановления напряжения

На основании анализа зависимостей, приведённых в таблице 3.6, и графических зависимостей рисунков 3.10 и 3.11, можно сделать выводы, аналогично сформулированным в разделе 3.2.2:

- независимо от мощности СД и отсутствия АРВ нарушение устойчивости в режиме самозапуска отсутствует. Однако время восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ с увеличением мощности СД возрастает;

- при включении АРВ и увеличении времени $T_{\text{ном}}$ устойчивость в режиме самозапуска нарушается при $T_{\text{ном}}$ больше 0,31 сек. для маломощного двигателя;

- при увеличении мощности СД, включении АРВ и увеличении времени $T_{\text{ном}}$ нарушения устойчивости не возникает. При этом время $T_{\text{восст}}$ при увеличении мощности СД уменьшается по сравнению со случаем отсутствия АРВ;

– при отсутствии регуляторов у СД, независимо от их мощности, с увеличением времени $T_{\text{ном}}$ происходит монотонное увеличение пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$. При этом с ростом мощности СД при перерыве питания больше 0,31 секунд пиковое значение тока $I_{\text{пик}}$ уменьшается по сравнению со случаем СД меньшей мощности;

– при любом АРВ маломощного двигателя ток $I_{\text{пик}}$ существенно возрастает по сравнению с отсутствием АРВ. Отсюда следует вывод, что в режиме самозапуска, с целью уменьшения тока $I_{\text{пик}}$, необходимо отключение регуляторов.

Зависимости, приведённые в таблице 3.6 и графики на рисунках 3.10 и 3.11 позволяют определить допустимые времена срабатывания релейной защиты, при которых будет иметь место устойчивый режим самозапуска СД при отсутствии или наличии АРВ и одновременной работе нескольких СД различной мощности для напряжения СЭС 110 кВ.

3.3. Способ снижения тока статора двигателя в случае кратковременного перерыва питания

Анализ вышеуказанных экспериментов подтверждает, что ток статора возрастает с увеличением времени восстановления напряжения. При отключении от сети одного или группы двигателей на шинах подстанции растёт остаточная ЭДС и при этом ток, протекающий при самозапуске СД, может превышать пусковой ток в несколько раз. При этом наличие АРВ приводит к дополнительному увеличению пикового значения тока статора.

Предлагаемое решение заключается в том, что регулятор по току возбуждения отключается до восстановления номинального напряжения. Рассмотрим случай для двигателя *СДВ-15-39-10* с регулированием по току возбуждения и перерыве питания 0,3 секунды. При отключении источника питания происходит срабатывание реле *Switch1* (рисунок 3.12), который в свою очередь обесточивает регулятор возбуждения W_{P1} . После перевода всей нагрузки на другой ввод и появлении на шинах двигателя напряжения, реле *Switch2* подает ток возбуждения в обмотку двигателя и СД выходит на номинальный режим работы.

Сравнение величин максимального тока при включенной и отключенной системе АРВ показывает, что ток статора в данных экспериментах возрастает примерно до 5,6 отн.ед. (рисунок 3.2) и 4,1 отн.ед. (рисунок 3.13) соответственно.

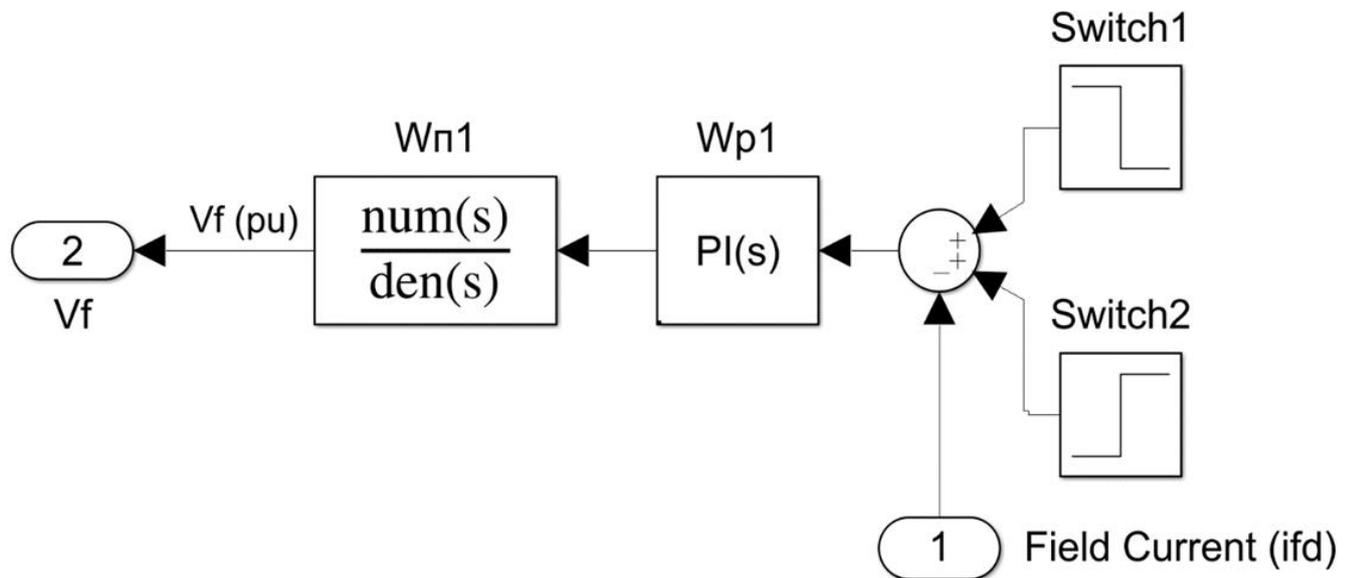


Рисунок 3.12 – Модель подсистемы управления возбуждением с отключаемым регулятором по току возбуждения синхронного электродвигателя

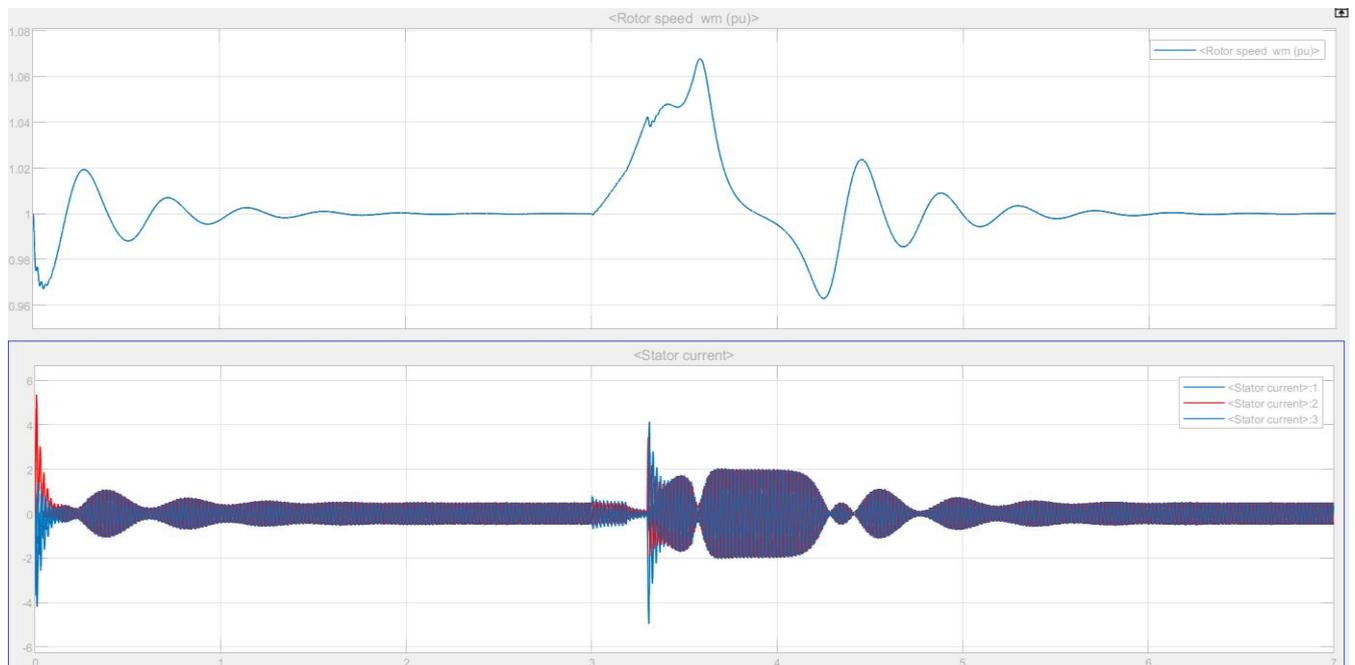


Рисунок 3.13 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае отключения АРВ

Следовательно предлагаемый способ позволяет снизить ток статора в среднем на 35%. Однако в этом случае увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы с использованием АРВ по току возбуждения, в среднем на 20%.

3.4. Способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей посредством форсировки возбуждения

Сохранение устойчивой работы СД в режиме самозапуска возможно посредством увеличения величины тока возбуждения в определенных пределах согласно ГОСТ 24688–81.

Рассмотрим неустойчивый случай для двигателя *СДВ-15-39-10* с регулированием по току возбуждения и перерыве питания 0,5 секунд (рисунок 3.3).

При отключении источника питания необходимо увеличить величину тока возбуждения до 1,5 отн.ед., а после перевода всей нагрузки на другой ввод и появлении на шинах двигателя напряжения, через выдержку времени, подать номинальный ток возбуждения в обмотку двигателя, то СД выходит на номинальный режим работы, не теряя устойчивости (рисунок 3.14).

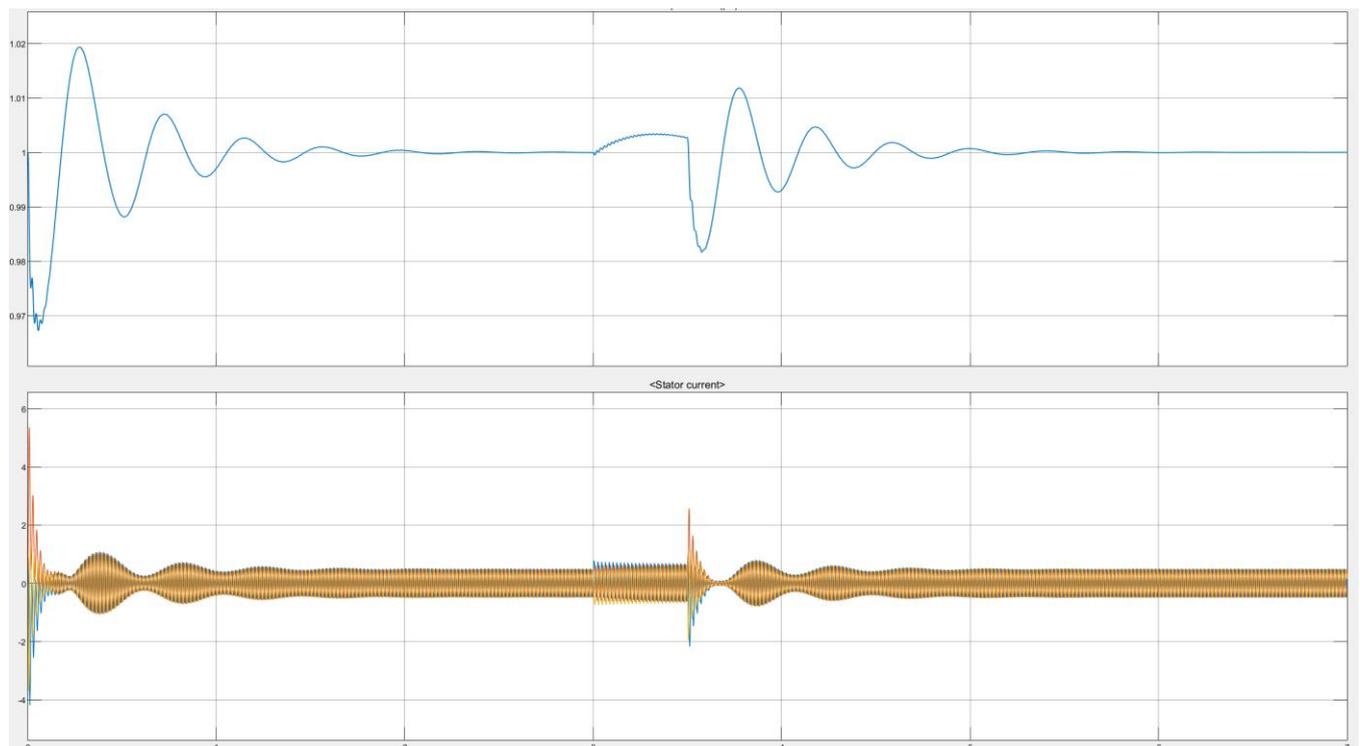


Рисунок 3.14 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае форсировки возбуждения

Сравнения графиков переходных процессов на рисунках 3.3 и 3.14 позволяют сделать вывод, что сохранение устойчивой работы СД в режиме самозапуска возможно посредством форсировки возбуждения до 1,5 отн.ед.

3.5. Рекомендации по обеспечению самозапуска синхронных электродвигателей в случае кратковременного перерыва питания

В таблице 3.7 обобщены основные результаты исследований самозапуска синхронных двигателей в системе электроснабжения в случае кратковременного перерыва питания.

Таблица 3.7.

Тип аварий		Параметры синхронных двигателей			
		Мощность < 2 МВ·А		Мощность > 2 МВ·А	
		Применение АРВ	Пиковые токи статора	Применение АРВ	Пиковые токи статора
Перерыв питания	Увеличение времени восстановления напряжения	Для любых АРВ не должно превышать 0,3 сек.	Возрастают в среднем в 2 раза	Не нарушается устойчивость СД	Возрастают в среднем в 2 раза
	Увеличение мощности КЗ	Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 4–5% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора		Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 6–7% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора	
	Номинальное напряжение внешней СЭС	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора увеличивается на 8%		С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора увеличивается на 8%	
	АРВ с отключаемым регулятором по току возбуждения	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 20%, а пиковый ток статора уменьшается на 35%		Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 22%, а пиковый ток статора уменьшается на 30%	

Результаты, отраженные в таблице 3.7, позволяют оценить влияние структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, системы АРВ при одновременной работе нескольких СД разной мощности на протекание переходных процессов самозапуска синхронных двигателей в случае кратковременного перерыва питания:

1. Для всех типов АРВ, с увеличением мощности КЗ от 390 до 1590 МВ·А, время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 3–4%.

Влияние мощности КЗ на пиковые значения тока статора не установлено.

2. При наличии одноконтурного АРВ, с увеличением времени восстановления напряжения от 0,1 до 0,3 секунд, время выхода двигателя меньшей мощности на номинальный режим работы возрастает в среднем на 20%, тогда как двигатель большей мощности в среднем на 30%.

Пиковые значения тока статора возрастают в среднем в 2 раза для обоих двигателей при использовании одноконтурного АРВ.

С увеличением времени восстановления напряжения более 0,3 секунд нарушается устойчивость работы двигателя меньшей мощности.

3. При наличии двухконтурного АРВ, с увеличением времени перерыва питания до 0,3 секунд, время выхода двигателя меньшей мощности на номинальный режим работы возрастает на 21%, тогда как двигатель большей мощности на 11%.

Пиковые значения тока статора возрастают на 20% для обоих двигателей при наличии двухконтурного АРВ в сравнении с одноконтурным.

С увеличением времени восстановления напряжения более 0,3 секунд нарушается устойчивость работы двигателя меньшей мощности.

4. Применение двухконтурного АРВ требует большее время, по сравнению с применением одноконтурного АРВ, необходимое СД для восстановления нормального режима работы, в среднем на 4%.

5. С увеличением величины номинального напряжения с 35 кВ до 110 кВ, время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5% для всех типов АРВ, тогда как пиковый ток статора увеличивается в среднем на 10%.

На основании полученных результатов были сформулированы следующие выводы и рекомендации по нахождению оптимальных параметров самозапуска СД в системе электроснабжения в случае кратковременного перерыва питания:

1. На устойчивость самозапуска синхронного электродвигателя влияют следующие факторы:

- полная мощность СД $S_{сд}$;
- время восстановления напряжения $T_{ном}$;

- структура системы АРВ синхронного электродвигателя.
- напряжение питания СЭС $U_{\text{ном}}$;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{\text{КЗ}}$.

2. Обеспечить устойчивую работу синхронного электродвигателя возможно следующими способами:

- изменить настройки релейной защиты с целью уменьшения времени восстановления напряжения $T_{\text{ном}}$ до 0,3 секунд или менее;
- выполнить форсировку возбуждения СД до восстановления номинального напряжения.

3. Обеспечить снижение тока статора СД возможно отключением АРВ синхронного двигателя до восстановления номинального напряжения.

3.6. Выводы по третьей главе

1. Разработана модель схемы электроснабжения предприятия, учитывающая кратковременное снижение напряжения.

2. Определено влияние структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, системы АРВ при одновременной работе нескольких СД разной мощности на протекание переходных процессов самозапуска синхронных двигателей в случае кратковременного перерыва питания.

3. Получены зависимости, характеризующие особенности самозапуска СД в случае кратковременного перерыва питания на основе учёта структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, одновременной работы нескольких синхронных электродвигателей разной мощности, системы автоматического регулирования возбуждения, которые позволяют определить комплекс мероприятий обеспечивающие самозапуск СД.

4. Предложен способ снижения тока статора синхронных двигателей в режиме самозапуска, основанный на отключении контура регулирования тока возбуждения. Предлагаемый способ позволяет снизить ток статора в среднем на 35%. Однако в этом случае увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы, в среднем на 20% в зависимости от типа АРВ.

5. Предложен способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей в случае кратковременного перерыва питания в системе электроснабжения посредством форсировки возбуждения синхронного электродвигателя. Данный способ позволяет реализовать самозапуск при увеличении времени срабатывания релейной защиты до 0,3–0,5 секунд.

6. На основании выполненных исследований обоснованы параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ САМОЗАПУСКА СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

4.1. Математическая модель системы электроснабжения промышленного предприятия при коротких замыканиях

Разработанная модель СЭС промышленного предприятия в программной среде Matlab Simulink, учитывающая режимы короткого замыкания, приведена на рисунке 4.1. Исследование самозапуска СД рассмотрено на примере короткого замыкания шины, к которой подключена нагрузка и СД. Подробное описание модели СЭС и реализованных элементов рассмотрено во второй главе.

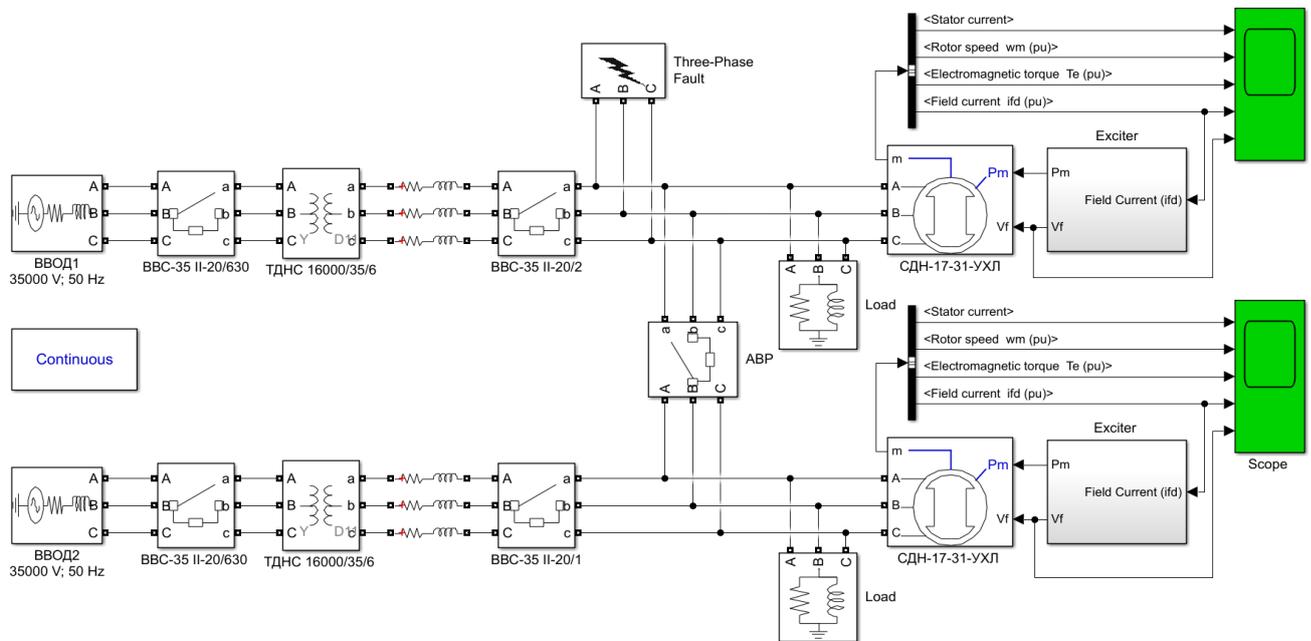


Рисунок 4.1 – Обобщенная модель системы электроснабжения предприятия

4.2. Моделирование короткого замыкания

Для оценки возможности самозапуска, границы диапазона времени отключения приняты от 0,1 сек. (минимальное время отключения с учетом времени действия РЗА) до 0,5 сек. (время восстановления напряжения на двигателе средствами РЗА).

В случае короткого замыкания частота вращения ротора изменяется незначительно. Поэтому принято допущение о постоянстве механической нагрузки

на валу электродвигателя при исследовании переходных процессов в этом режиме. Величина нагрузки на валу принята равной номинальной.

Переходные процессы при однофазных замыканиях не исследовались, так как в большинстве случаев однофазные замыкания переходят в трехфазные или двухфазные короткие замыкания [71, 101–107].

При проведении экспериментов исследовалось влияние на процесс самозапуска СД следующих факторов и их значений:

- напряжение питания СЭС $U_{\text{ном}}$: 35 и 110 кВ;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{\text{КЗ}}$: 390 , 790 и 1590 МВ · А;
- полная мощность СД $S_{\text{сд}}$: 880 кВА (СДВ-15-39-10), 2222 кВА (СДВ-16-64-12);
- время устранения КЗ напряжения $T_{\text{ном}}$: 0,1, 0,3 и 0,5 секунд;
- вид короткого замыкания: трехфазное/двухфазное.

При проведении экспериментов исследовалось влияние на переходные процессы самозапуска следующих структур систем АРВ:

- отсутствие системы автоматического регулирования (АП);
- одноконтурная система автоматического регулирования тока возбуждения синхронного электродвигателя (РТВ);
- двухконтурная система автоматического регулирования реактивной мощности синхронного электродвигателя (РРМ).

Были проведены следующие эксперименты:

1. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

2. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

3. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

4. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 35 кВ.

5. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

6. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-15-39-10 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

7. Аварийное отключение при трёхфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

8. Аварийное отключение при двухфазном коротком замыкании и моделирование самозапуска электродвигателя СДВ-16-64-12 при номинальном значении напряжения СЭС 110 кВ.

При построении графиков переходных процессов для удобства их анализа все величины на графиках заданы в относительных единицах. За базисные значения приняты: ток статора $I_{\text{НОМ}} = 67 \text{ А}$, скорость двигателя $n_{\text{НОМ}} = 250 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ (СДВ-15-39-10); ток статора $I_{\text{НОМ}} = 214 \text{ А}$, скорость двигателя $n_{\text{НОМ}} = 300 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ (СДВ-16-64-12). При моделировании КЗ сопротивление в месте замыкания принималось равным 0.0001 Ом.

4.2.1. Моделирование коротких замыканий для синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 35 кВ

Результаты экспериментов компьютерной модели для двигателя меньшей мощности *СДВ-15-39-10* и номинального напряжения СЭС $U_{\text{НОМ}} = 35 \text{ кВ}$ приведены в таблице 4.1 (трёхфазное КЗ) и таблице 4.2 (двухфазное КЗ).

Для каждого сочетания варьируемых факторов в таблицах 4.1 и 4.2 приведены значения времени выхода двигателя на номинальный режим работы

после устранения КЗ $T_{\text{восст}}$ и пиковое значение тока статора СД $I_{\text{пик}}$, а также дана оценка нарушению устойчивости (Нет/Да).

Таблица 4.1.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$	
1	3 ф. КЗ	35	АП	0,1	390	Нет	3,91	4,7	
2					790	Нет	4,04		
3					1590	Нет	4,17		
4				0,3	390	Нет	4,42		
5					790	Нет	4,55		
6					1590	Нет	4,68		
7				0,5	390	Нет	5,03		
8					790	Нет	5,16		
9					1590	Нет	5,29		
10			РТВ		0,1	390	Нет	4,12	4,4
11						790	Нет	4,27	
12						1590	Нет	4,39	
13					0,3	390	Да	-	-
14						790	Да	-	
15						1590	Да	-	
16					0,5	390	Да	-	-
17						790	Да	-	
18						1590	Да	-	
19			РРМ		0,1	390	Нет	4,16	4,15
20						790	Нет	4,27	
21						1590	Нет	4,31	
22					0,3	390	Нет	4,64	
23						790	Нет	4,79	
24						1590	Нет	4,83	
25					0,5	390	Нет	5,12	
26						790	Нет	5,27	
27						1590	Нет	5,39	

- 1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
 2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
 3) – время устранения КЗ, сек.
 4) – мощность КЗ, МВА.
 5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
 6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Таблица 4.2.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$
1		35	АП	0,1	390	Нет	3,82	3,6
2					790	Нет	3,93	
3					1590	Нет	4,01	
4				0,3	390	Нет	4,19	
5					790	Нет	4,3	
6					1590	Нет	4,43	

7	2 ф. КЗ			0,5	390	Нет	4,75	3,4		
8					790	Нет	4,85			
9					1590	Нет	4,92			
10					РТВ	0,1	390		Нет	3,77
11							790		Нет	3,87
12							1590		Нет	3,94
13						0,3	390		Нет	4,12
14							790		Нет	4,28
15							1590		Нет	4,35
16				0,5		390	Нет		4,42	
17						790	Нет		4,59	
18						1590	Нет		4,66	
19				РРМ	0,1	390	Нет		3,83	3,25
20						790	Нет		4,06	
21						1590	Нет		4,11	
22					0,3	390	Нет		4,27	
23						790	Нет		4,68	
24						1590	Нет		4,71	
25					0,5	390	Нет		4,93	
26						790	Нет		5,02	
27						1590	Нет		5,17	

- 1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
- 2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
- 3) – время устранения КЗ, сек.
- 4) – мощность КЗ, МВА.
- 5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
- 6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведённых в таблице 4.1, показывает, что при увеличении времени устранения КЗ от 0,1 до 0,3 сек. наблюдается нарушение устойчивости. Для двухфазных КЗ с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 15%, но при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости (таблица 4.2).

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведённых в таблицах 4.1 и 4.2, показывает, что с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек., и мощности КЗ время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 19%, а при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблиц 4.1 и 4.2 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5%, для всех типов АРВ.

На рисунках 4.2 и 4.3 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при трехфазных КЗ для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,1 \text{ с}$ и $0,3 \text{ сек}$. На графиках приведены зависимости изменения частоты вращения ротора и тока статора от времени для следующих режимов: вхождение в синхронизм при пуске, номинальный режим работы СД, самозапуск в случае короткого замыкания, установившийся режим или выпадение двигателя из синхронизма.

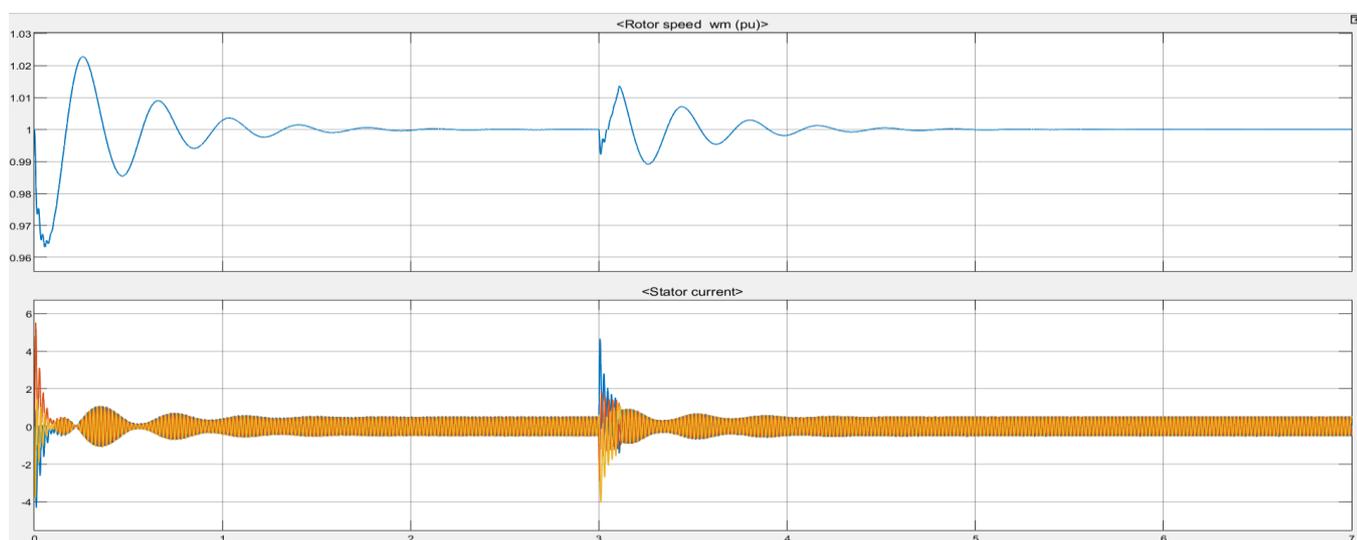


Рисунок 4.2 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при трехфазном коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,1 \text{ сек}$

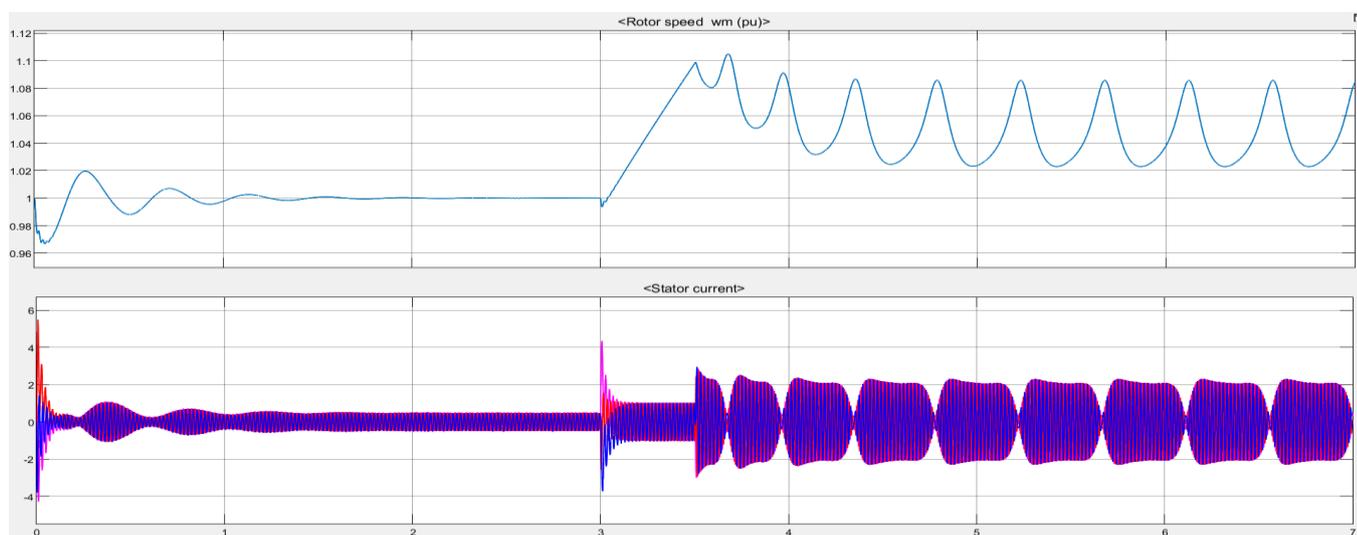


Рисунок 4.3 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при трехфазном коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

Анализ рисунков 4.2 и 4.3 показывает, что при трехфазном КЗ двигатель успевает выпасть из синхронизма при времени устранения КЗ большем 0,1 сек. Также во всех случаях КЗ время восстановления номинального режима работы СД существенно больше, чем время для описанного во главе 3 эксперимента аварийного отключения одного из источников питания.

Результаты экспериментов компьютерной модели для двигателя большей мощности *СДВ-16-64-12* и номинального напряжения СЭС $U_{НОМ} = 35$ кВ приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{НОМ}^1$	СВ ²	$T_{НОМ}^3$	$S_{КЗ}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{восст}^5$	$I_{пик}^6$	
1	3 ф. КЗ	35	АП	0,1	390	Нет	2,71	10	
2					790	Нет	2,82		
3					1590	Нет	2,93		
4				0,3	390	Нет	3,04		
5					790	Нет	3,15		
6					1590	Нет	3,26		
7				0,5	390	Нет	3,39		
8					790	Нет	3,48		
9					1590	Нет	3,57		
10			РТВ	35	0,1	390	Нет	1,66	5,1
11						790	Нет	1,75	
12						1590	Нет	1,84	
13					0,3	390	Нет	2,93	
14						790	Нет	3,03	
15						1590	Нет	3,11	
16					0,5	390	Нет	3,71	
17						790	Нет	3,84	
18						1590	Нет	3,97	
19			РРМ	35	0,1	390	Нет	1,82	4,8
20						790	Нет	1,95	
21						1590	Нет	2,08	
22					0,3	390	Нет	2,63	
23						790	Нет	2,76	
24						1590	Нет	2,89	
25					0,5	390	Нет	3	
26						790	Нет	3,1	
27						1590	Нет	3,2	

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.

2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).

3) – время устранения КЗ, сек.

4) – мощность КЗ, МВА.

5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.

6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Таблица 4.4.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{ВОССТ}}^5$	$I_{\text{ПИК}}^6$	
1	2 ф. КЗ	35	АП	0,1	390	Нет	1,46	7,7	
2					790	Нет	1,51		
3					1590	Нет	1,63		
4				0,3	390	Нет	1,75		
5					790	Нет	1,85		
6					1590	Нет	1,95		
7				0,5	390	Нет	2,15		
8					790	Нет	2,26		
9					1590	Нет	2,34		
10			РТВ	35	0,1	390	Нет	1,63	3,85
11						790	Нет	1,72	
12						1590	Нет	1,81	
13					0,3	390	Нет	1,96	
14						790	Нет	2,05	
15						1590	Нет	2,14	
16					0,5	390	Нет	2,29	
17						790	Нет	2,38	
18						1590	Нет	2,47	
19			РРМ	35	0,1	390	Нет	1,41	3,65
20						790	Нет	1,54	
21						1590	Нет	1,67	
22					0,3	390	Нет	2,22	
23						790	Нет	2,35	
24						1590	Нет	2,48	
25					0,5	390	Нет	2,83	
26						790	Нет	2,96	
27						1590	Нет	3,09	

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
3) – время устранения КЗ, сек.
4) – мощность КЗ, МВА.
5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведённых в таблицах 4.3 и 4.4, показывает, что с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 54% и 27% соответственно, а при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведённых в таблицах 4.3 и 4.4, показывает, что с увеличением времени

устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 37% и 43% соответственно, а при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблиц 4.3 и 4.4 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5%, для всех типов АРВ.

На рисунках 4.4 и 4.5 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при трехфазном и двухфазном КЗ для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек.}$

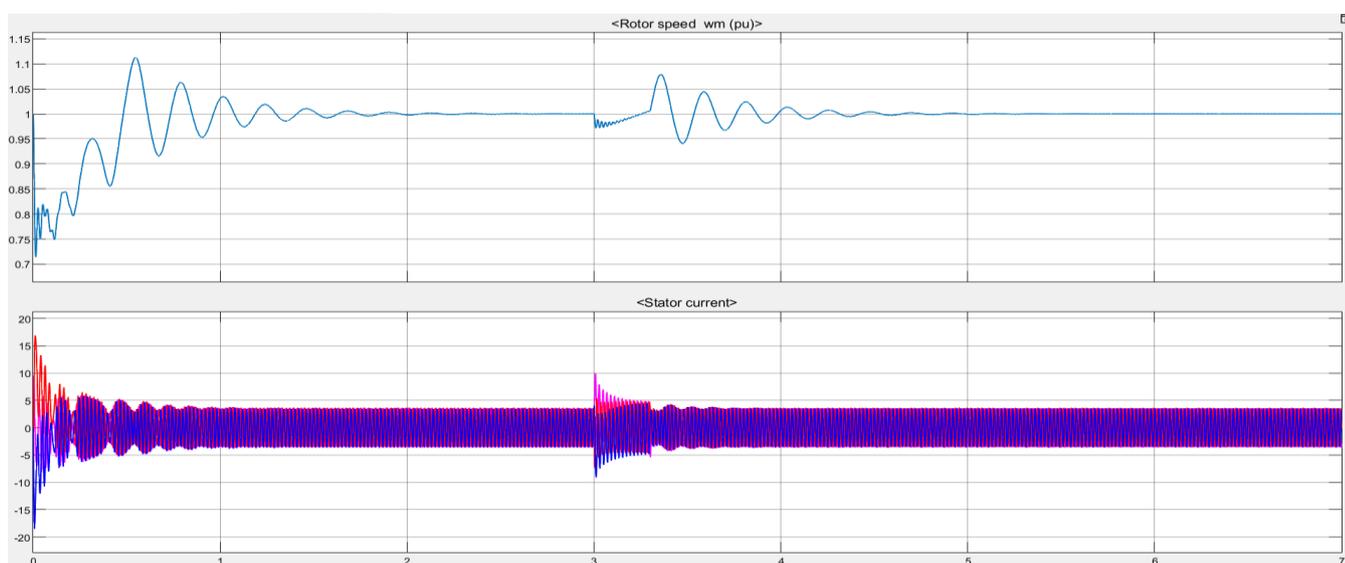


Рисунок 4.4 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при трехфазном коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

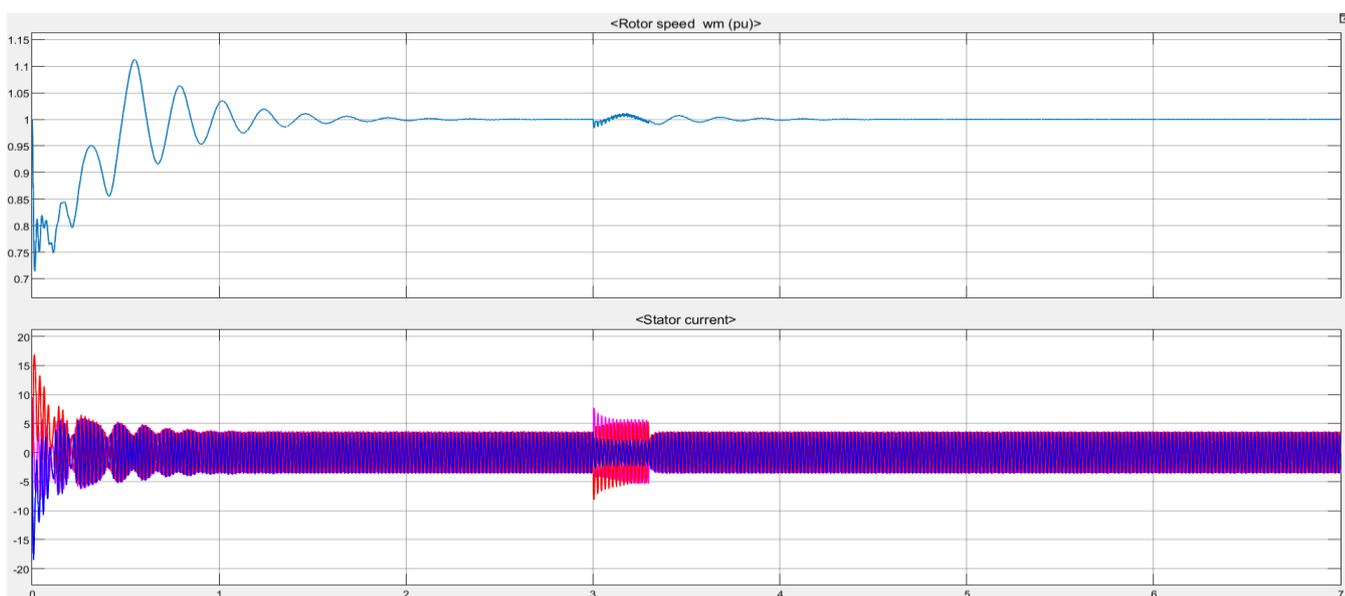


Рисунок 4.5 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при двухфазном коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

Анализ рисунков 4.3 и 4.4 показывает существенное возрастание тока статора в сравнении с другими методами регулирования возбуждения СД, поэтому неконтролируемое повышение тока статора может привести к выходу из строя синхронных двигателей.

На основе анализа результатов, приведённых в таблицах 4.1–4.4, сделаны следующие выводы:

1. Отсутствие системы АРВ:

– При увеличении времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. нарушение устойчивости отсутствует;

– Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;

– Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. пиковое значение тока статора при коротких замыканиях $I_{\text{пик}}$ не изменяется;

– Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;

– Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$.

2. Наличие АРВ по току возбуждения и реактивной мощности:

– При трёхфазном КЗ и наличии АРВ по току возбуждения увеличение времени устранения КЗ выше 0,3 сек. нарушает устойчивость работы СД меньшей мощности. Во всех остальных случаях устойчивость не нарушается;

– Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;

– Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. пиковое значение тока статора при коротких замыканиях $I_{\text{пик}}$ не изменяется;

– Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;

– Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$;

– Включение АРВ по току возбуждения или реактивной мощности приводит к уменьшению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$;

– Во всех случаях при трёхфазном КЗ время выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$ превышает время выхода двигателя на номинальный режим работы при двухфазном КЗ;

– Во всех случаях при трёхфазном КЗ пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$ превышает пиковое значение тока статора при двухфазном КЗ.

Сравнивая результаты, приведённые в таблицах 4.1–4.4 можно сделать вывод, что увеличение мощности СД при наличии АРВ приводит к повышению устойчивости самозапуска СД и уменьшению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$.

4.2.2. Зависимости самозапуска СД при коротких замыканиях и напряжении внешнего электроснабжения 35 кВ

Получим зависимости времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ и пикового значения тока статора СД $I_{\text{пик}}$ от времени устранения КЗ $T_{\text{ном}}$, характеризующие особенности самозапуска СД в случае коротких замыканий и напряжения СЭС 35 кВ.

При этом влияние мощности КЗ на время восстановления нормального режима работы и пиковое значение тока статора СД не учитывается, так как сделанный ранее анализ таблиц 4.1–4.4 показал, что изменение мощности КЗ незначительно влияет (менее 5–10%) на время восстановления нормального режима работы СД, и практически не влияет на результаты пиковых значений тока статора.

Для получения зависимостей используется трёхуровневый план проведения экспериментов для одной переменной при помощи программного пакета STATISTICA.

При использовании пакета STATISTICA принимается, что результаты машинных экспериментов получены на реальном объекте в условиях действия случайных помех, забывая об их фактическом происхождении. Тем самым можно

применять стандартные статистические оценки искомых зависимостей и их адекватности машинному эксперименту.

Получим следующие варианты идентичных зависимостей при трехфазных и двухфазных КЗ:

1. Двигатель меньшей мощности, отсутствие АРВ;
2. Двигатель меньшей мощности, наличие АРВ по току возбуждения;
3. Двигатель меньшей мощности, наличие АРВ по реактивной мощности;
4. Двигатель большей мощности, отсутствие АРВ;
5. Двигатель большей мощности, наличие АРВ по току возбуждения;
6. Двигатель большей мощности, наличие АРВ по реактивной мощности.

С помощью данного программного пакета получены зависимости времени восстановления нормального режима работы ($T_{\text{восст}}$) в случае коротких замыканий ($I_{\text{пик}}$) СД от времени устранения КЗ ($T_{\text{ном}}$) и значения коэффициента детерминации R^2 для рассматриваемых вариантов (таблица 4.5).

Для всех рассмотренных случаев коэффициент детерминации R^2 принимает значения равные или большие 0,9. Это означает, что предложенная модель адекватно описывает поведение выходной переменной при изменении входной переменной.

На основе полученных зависимостей (таблица 4.5) построены графики времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ (рисунки 4.6 и 4.7), и пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ от времени устранения КЗ $T_{\text{ном}}$ (рисунки 4.8 и 4.9).

Таблица 4.5.

35кВ 3ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R²	СДВ-16-64-12	R²
АП	$T_{\text{восст}} = 3,74 + 2,8 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95	$T_{\text{восст}} = 2,65 + 1,65 \cdot T_{\text{ном}}$	0,91
РТВ	-	-	$T_{\text{восст}} = 1,3 + 5,22 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97
РРМ	$T_{\text{восст}} = 3,99 + 2,53 \cdot T_{\text{ном}}$	0,988	$T_{\text{восст}} = 1,74 + 2,87 \cdot T_{\text{ном}}$	0,91
35кВ 2ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R²	СДВ-16-64-12	R²
АП	$T_{\text{восст}} = 3,66 + 2,3 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95	$T_{\text{восст}} = 1,34 + 1,79 \cdot T_{\text{ном}}$	0,96
РТВ	$T_{\text{восст}} = 3,7 + 1,74 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95	$T_{\text{восст}} = 1,55 + 1,65 \cdot T_{\text{ном}}$	0,93
РРМ	$T_{\text{восст}} = 3,75 + 2,6 \cdot T_{\text{ном}}$	0,89	$T_{\text{восст}} = 1,21 + 3,55 \cdot T_{\text{ном}}$	0,96

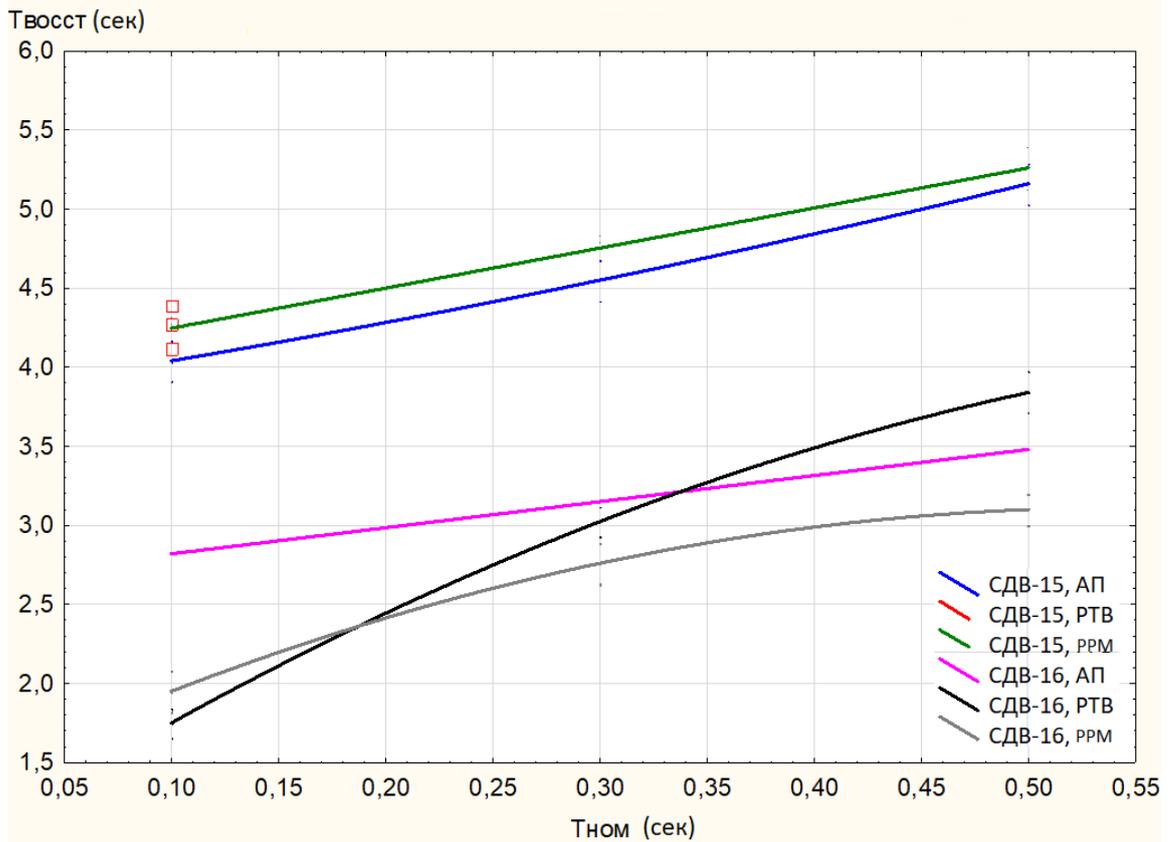


Рисунок 4.6 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени устранения трехфазного КЗ

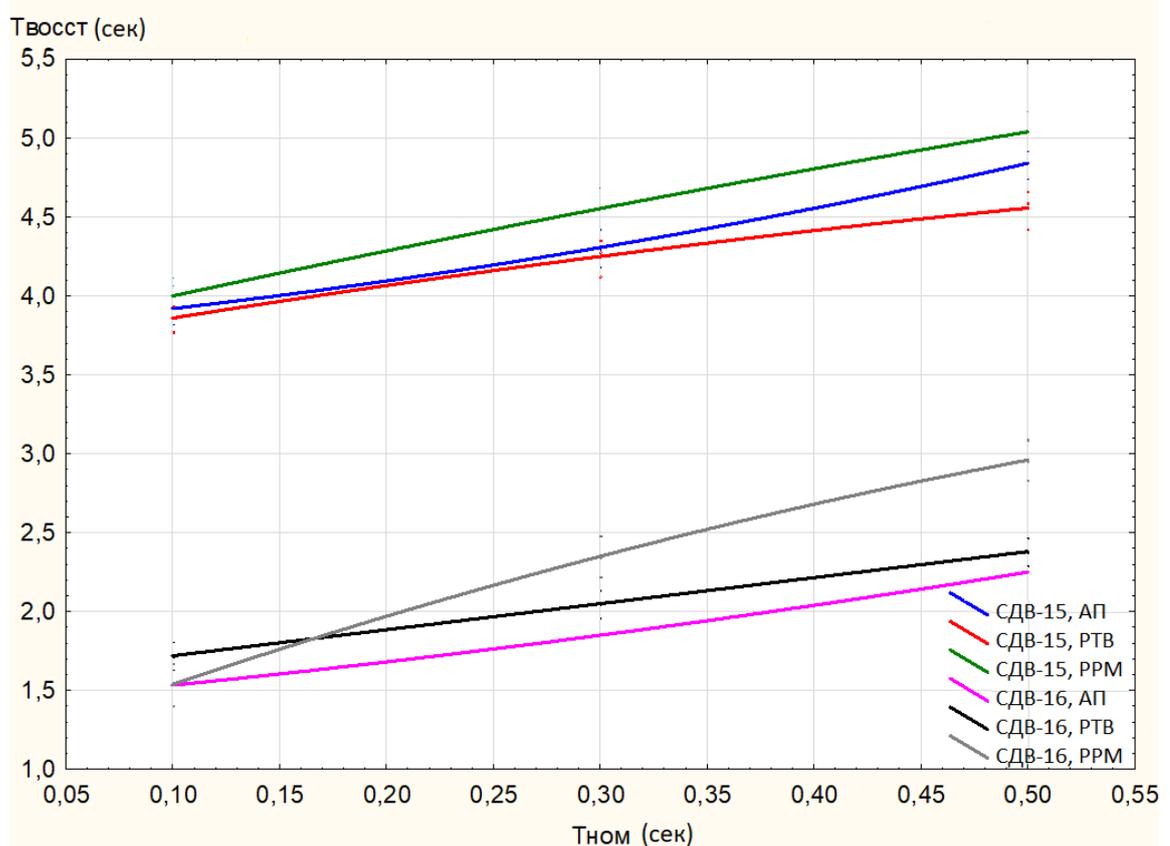


Рисунок 4.7 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени устранения двухфазного КЗ

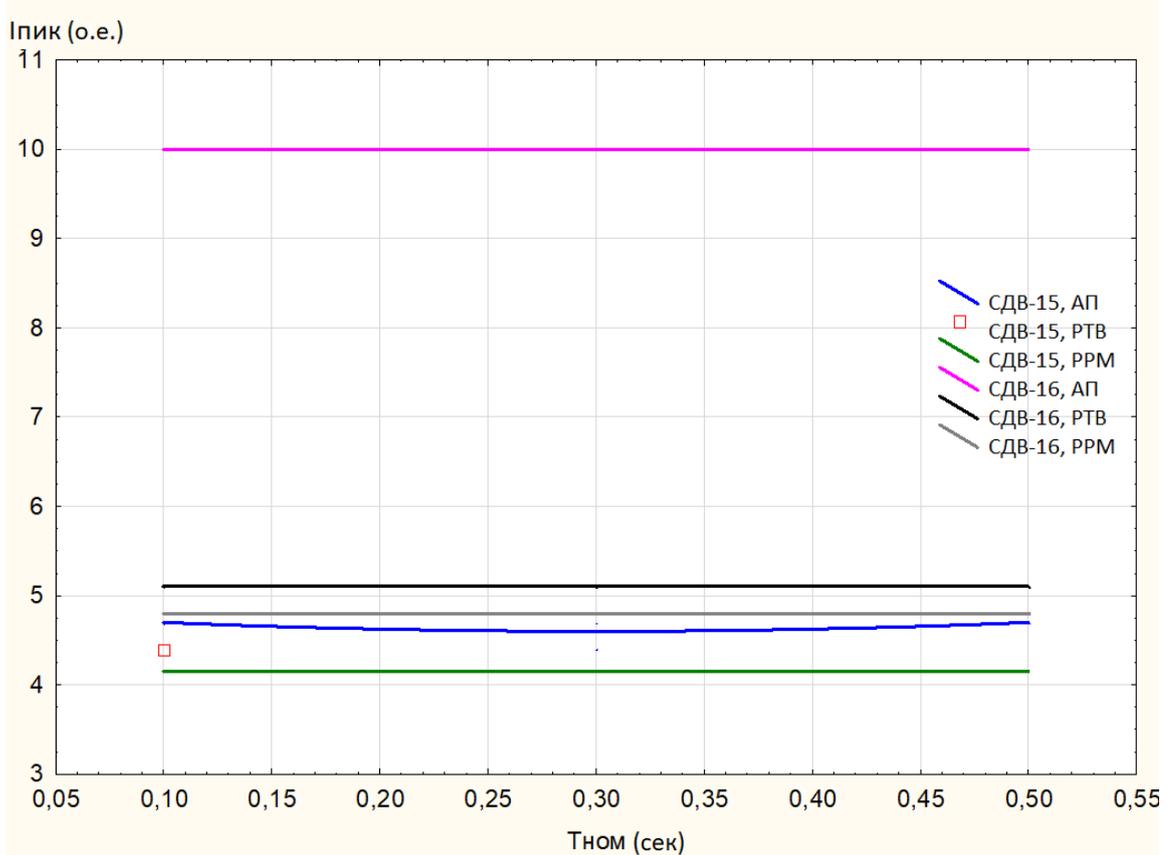


Рисунок 4.8 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени устранения трехфазного КЗ

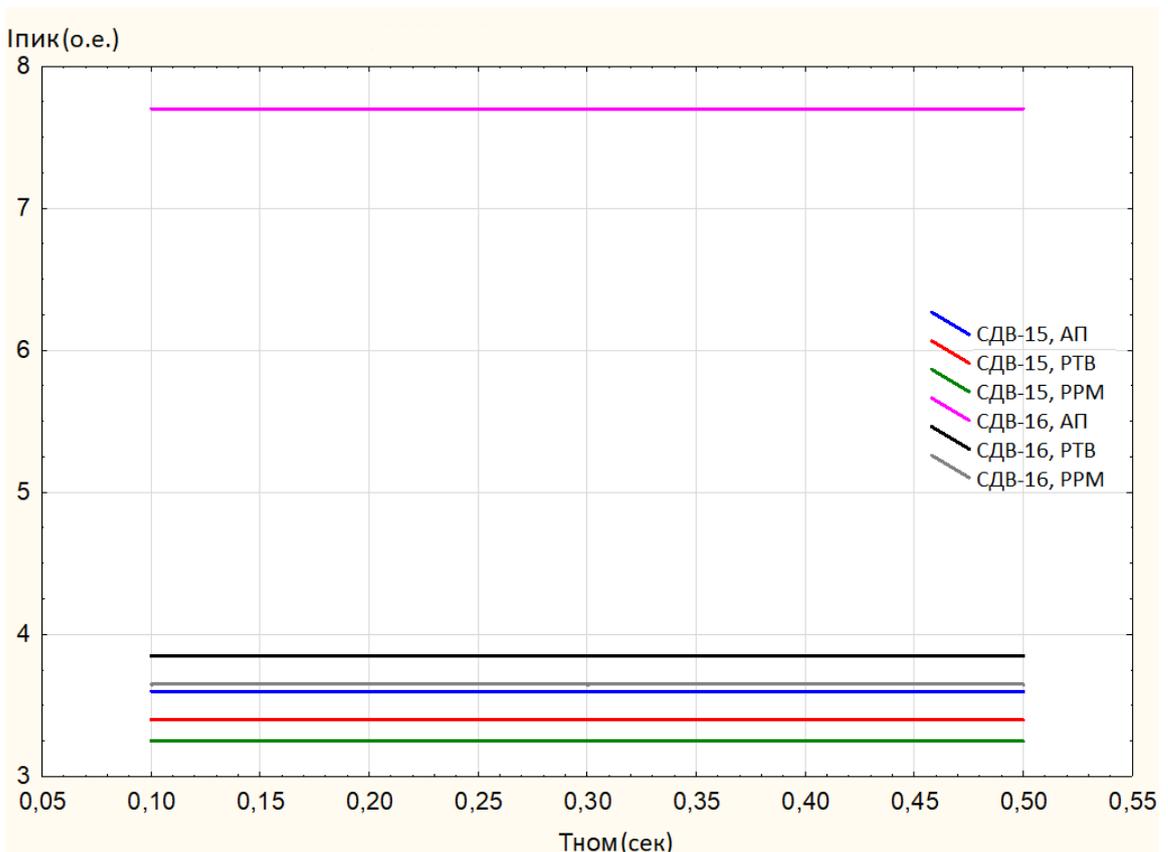


Рисунок 4.9 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени устранения двухфазного КЗ

На основании анализа зависимостей, приведённых в таблице 4.5, и графических зависимостей на рисунках 4.6–4.9, можно сделать следующие выводы:

- независимо от мощности СД и отсутствия АРВ нарушение устойчивости самозапуска отсутствует. Однако время восстановления $T_{\text{восст}}$ с увеличением мощности СД и переходу от трёхфазного к двухфазному КЗ уменьшается;

- для двигателя меньшей мощности при трёхфазном КЗ и включении АРВ по току возбуждения, увеличение времени $T_{\text{ном}}$ больше 0,11 сек. происходит с нарушением устойчивости самозапуска;

- при увеличении мощности СД, включении АРВ и увеличении времени $T_{\text{ном}}$ нарушения устойчивости самозапуска не возникает. При этом время $T_{\text{восст}}$ при увеличении мощности СД уменьшается по сравнению со случаем отсутствия АРВ;

- максимальные значения тока статора практически не зависят от времени $T_{\text{ном}}$, однако они зависят от параметров двигателей, применяемых систем АРВ и вида КЗ;

- максимальное значение тока статора существенно возрастает при любом виде КЗ в случае асинхронного пуска СД большей мощности и отсутствии АРВ;

- при любом АРВ и виде КЗ для двигателя меньшей мощности время восстановления номинального режима работы в несколько раз больше времени для электродвигателя большей мощности.

Зависимости, приведённые в таблице 4.5 и графики на рисунках 4.6–4.9 позволяют определить допустимые времена срабатывания релейной защиты, при которых будет иметь место устойчивый режим самозапуска СД при отсутствии или наличии АРВ и одновременной работе нескольких СД различной мощности для напряжения СЭС 35 кВ.

4.2.3. Моделирование коротких замыканий для синхронных двигателей при номинальном значении напряжения внешнего электроснабжения 110 кВ

Результаты экспериментов компьютерной модели для двигателя меньшей мощности *СДВ-15-39-10* и номинального напряжения СЭС $U_{\text{ном}} = 110$ кВ приведены в таблице 4.6 (трёхфазное КЗ) и таблице 4.7 (двухфазное КЗ).

Для каждого сочетания варьируемых факторов в таблицах 4.6 и 4.7 приведены значения времени выхода двигателя на номинальный режим работы после устранения КЗ $T_{\text{восст}}$ и пиковое значение тока статора СД $I_{\text{пик}}$, а также дана оценка нарушению устойчивости (Нет/Да).

Таблица 4.6.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$
1	3 ф, КЗ	110	АП	0,1	390	Нет	4,07	4,8
2					790	Нет	4,16	
3					1590	Нет	4,29	
4				0,3	390	Нет	4,58	
5				790	Нет	4,65		
6				1590	Нет	4,72		
7				0,5	390	Нет	5,19	
8				790	Нет	5,23		
9				1590	Нет	5,34		
10			РТВ	0,1	390	Нет	4,32	4,5
11					790	Нет	4,45	
12					1590	Нет	4,58	
13				0,3	390	Да	-	-
14				790	Да	-		
15				1590	Да	-		
16				0,5	390	Да	-	-
17				790	Да	-		
18				1590	Да	-		
19			РРМ	0,1	390	Нет	4,21	4,2
20					790	Нет	4,38	
21					1590	Нет	4,43	
22				0,3	390	Нет	4,74	
23				790	Нет	4,86		
24				1590	Нет	4,95		
25				0,5	390	Нет	5,21	
26				790	Нет	5,33		
27				1590	Нет	5,48		

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.

2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).

3) – время устранения КЗ, сек.

4) – мощность КЗ, МВА.

5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.

6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Таблица 4.7.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$	
1	2 ф. КЗ	110	АП	0,1	390	Нет	2,83	3,7	
2					790	Нет	2,96		
3					1590	Нет	3,09		
4				0,3	390	Нет	3,12		
5					790	Нет	3,25		
6					1590	Нет	3,38		
7				0,5	390	Нет	3,41		
8					790	Нет	3,54		
9					1590	Нет	3,67		
10			РТВ	110	0,1	390	Нет	1,71	3,5
11						790	Нет	1,82	
12						1590	Нет	1,93	
13					0,3	390	Нет	3,06	
14						790	Нет	3,15	
15						1590	Нет	3,24	
16					0,5	390	Нет	3,83	
17						790	Нет	3,92	
18						1590	Нет	4,01	
19			РРМ	110	0,1	390	Нет	1,97	3,3
20						790	Нет	2,08	
21						1590	Нет	2,19	
22					0,3	390	Нет	2,78	
23						790	Нет	2,81	
24						1590	Нет	2,83	
25					0,5	390	Нет	3,12	
26						790	Нет	3,24	
27						1590	Нет	3,36	

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
3) – время устранения КЗ, сек.
4) – мощность КЗ, МВА.
5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведённых в таблице 4.6, показывают, что при увеличении времени устранения КЗ до 0,3 сек. наблюдается нарушение устойчивости. Для двухфазных КЗ с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 53%, но при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости (таблица 4.7).

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведённых в таблицах 4.6 и 4.7, показывает, что с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 39% и 17% соответственно, а при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблиц 4.6 и 4.7 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 4% для всех типов АРВ.

Сравнение пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ и времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$ в таблицах 4.1–4.2 и 4.6–4.7 показывает, что переход с напряжения 35 кВ на 110 кВ при одинаковой мощности электродвигателя приводит к незначительному (5–8%) увеличению $I_{\text{пик}}$ и $T_{\text{восст}}$.

На рисунках 4.10 и 4.11 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при трехфазных КЗ для времени устранения КЗ $T_{\text{ном}} = 0,1$ с и 0,3 сек.

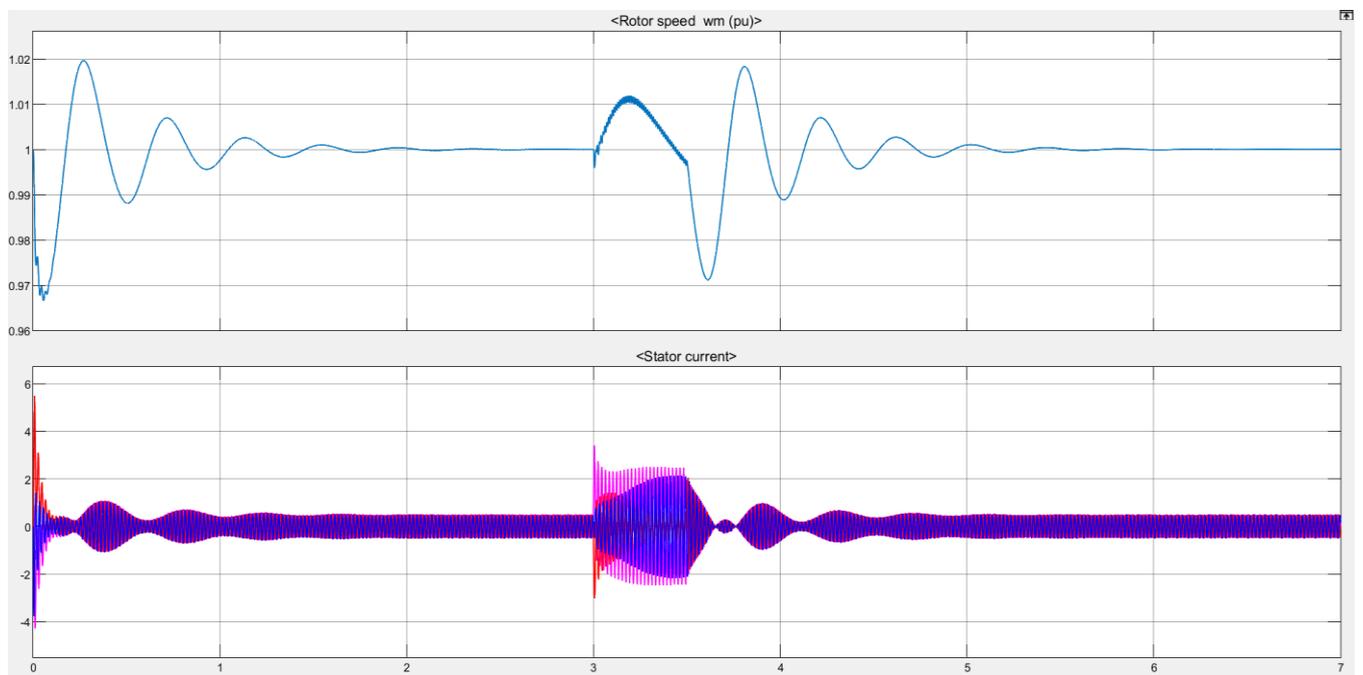


Рисунок 4.10 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{ном}} = 0,1$ сек

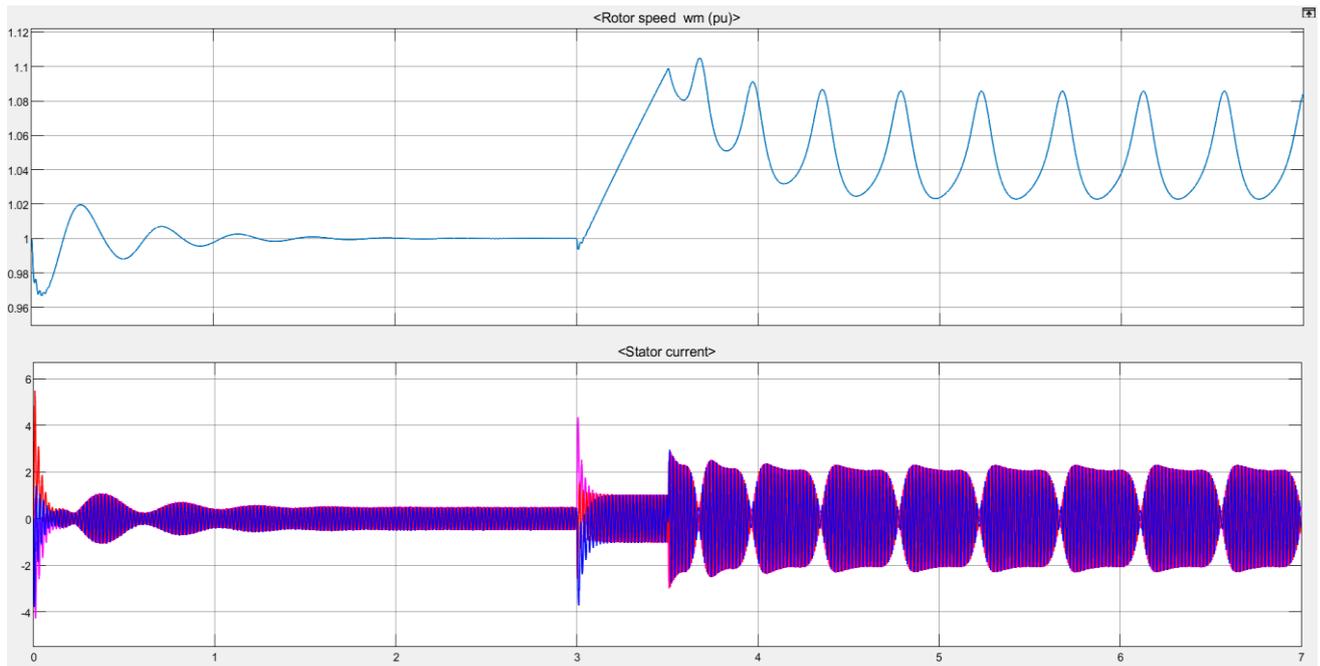


Рисунок 4.11 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

Анализ рисунков 4.10 и 4.11 показывает, что при трехфазном КЗ двигатель успевает выпасть из синхронизма при времени КЗ большем чем 0,1 секунда. Также во всех случаях КЗ время восстановления нормального режима работы существенно больше, чем время для описанного во главе 3 эксперимента аварийного отключения одного из источников питания.

Результаты экспериментов для двигателя большей мощности *СДВ-16-64-12* и номинального напряжения внешнего электроснабжения $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ кВ}$ приведены в таблицах 4.8 и 4.9.

Таблица 4.8.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{\text{НОМ}}^1$	СВ ²	$T_{\text{НОМ}}^3$	$S_{\text{КЗ}}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{\text{восст}}^5$	$I_{\text{пик}}^6$	
1	3 ф. КЗ	110	АП	0,1	390	Нет	3,92	9,4	
2					790	Нет	4,07		
3					1590	Нет	4,19		
4				0,3	390	Нет	4,24		
5				790	Нет	4,39			
6				1590	Нет	4,53			
7				0,5	390	Нет	4,97		
8				790	Нет	5,05			
9				1590	Нет	5,13			
10			РТВ	110	0,1	390	Нет	3,89	4,7
11						790	Нет	3,95	
12						1590	Нет	4,01	
13						0,3	390	Нет	

14					790	Нет	4,35		
15					1590	Нет	4,47		
16				0,5	390	Нет	4,58		
17					790	Нет	4,65		
18					1590	Нет	4,72		
19			PPM	0,1	390	Нет	3,9	4,4	
20						790	Нет		4,06
21						1590	Нет		4,13
22				0,3	390	Нет	4,37		
23						790	Нет		4,75
24						1590	Нет		4,81
25				0,5	390	Нет	5,05		
26						790	Нет		5,17
27						1590	Нет		5,23

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
3) – время устранения КЗ, сек.
4) – мощность КЗ, МВА.
5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Таблица 4.9.

№ п/п	Тип возмущения	$U_{НОМ}^1$	СВ ²	$T_{НОМ}^3$	$S_{КЗ}^4$	Нарушение устойчивости	$T_{ВОССТ}^5$	$I_{ПИК}^6$		
1	2 ф. КЗ	110	АП	0,1	390	Нет	1,59	7,2		
2						790	Нет		1,68	
3						1590	Нет		1,57	
4					0,3	390	Нет		1,85	
5						790	Нет		1,92	
6						1590	Нет		2	
7					0,5	390	Нет		2,2	
8						790	Нет		2,31	
9						1590	Нет		2,4	
10				РТВ	0,1	390	Нет	1,71	3,5	
11							790	Нет		1,82
12							1590	Нет		1,9
13					0,3	390	Нет	2,05		
14							790	Нет		2,11
15							1590	Нет		2,28
16					0,5	390	Нет	2,37		
17							790	Нет		2,43
18							1590	Нет		2,51
19				PPM	0,1	390	Нет	1,51	3,3	
20							790	Нет		1,62
21							1590	Нет		1,71
22					0,3	390	Нет	2,34		
23							790	Нет		2,45
24							1590	Нет		2,57
25					0,5	390	Нет	2,9		

26					790	Нет	3,07	
27					1590	Нет	3,19	

1) – номинальное значение напряжения внешнего электроснабжения, кВ.
2) – система возбуждения (АП – асинхронный пуск, РТВ – одноконтурный регулятор по току возбуждения, РРМ – двухконтурный регулятор по реактивной мощности).
3) – время устранения КЗ, сек.
4) – мощность КЗ, МВА.
5) – время, за которое двигатель выходит на номинальный режим работы после аварийного режима, сек.
6) – пиковое значение тока статора, отн.ед.

Результаты компьютерных экспериментов для АРВ по току возбуждения, приведённых в таблицах 4.8 и 4.9, показывают, что с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 15% и 25% соответственно, а при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Анализ результатов в случае применения АРВ по реактивной мощности, приведённых в таблицах 4.8 и 4.9, показывает, что с увеличением времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. и мощности КЗ, время выхода СД на номинальный режим работы возрастает в среднем на 21% и 47% соответственно, а при увеличении времени до 0,5 сек. не наблюдается нарушение устойчивости.

Из таблиц 4.8 и 4.9 видно, что с увеличением мощности КЗ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5% для всех типов АРВ.

На рисунках 4.12 и 4.13 приведены примеры графиков переходных процессов частоты вращения ротора и тока статора СД при трехфазном и двухфазном КЗ для времени устранения КЗ $T_{ном} = 0,3$ сек.

Анализ рисунков 4.12 и 4.13 показывает существенное возрастание тока статора в сравнении с другими методами регулирования возбуждения СД, в связи с этим неконтролируемое повышение тока статора может привести к выходу из строя синхронных двигателей.

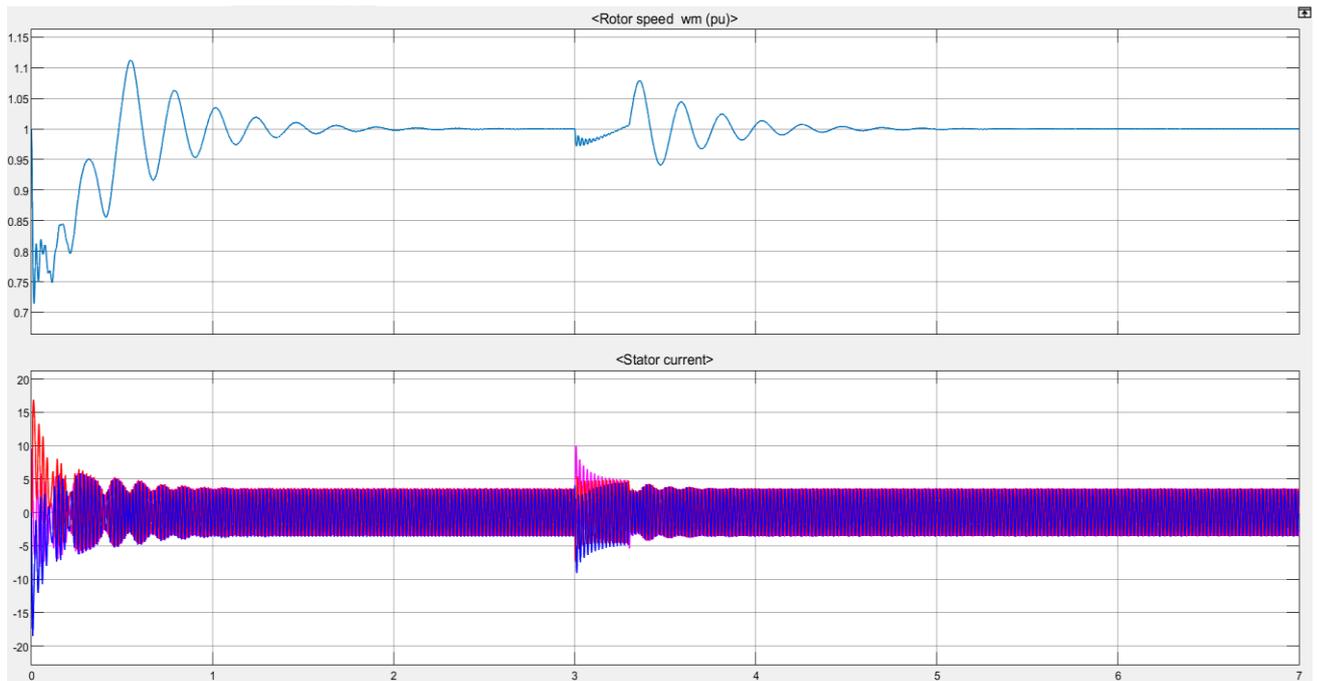


Рисунок 4.12 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при трехфазном коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

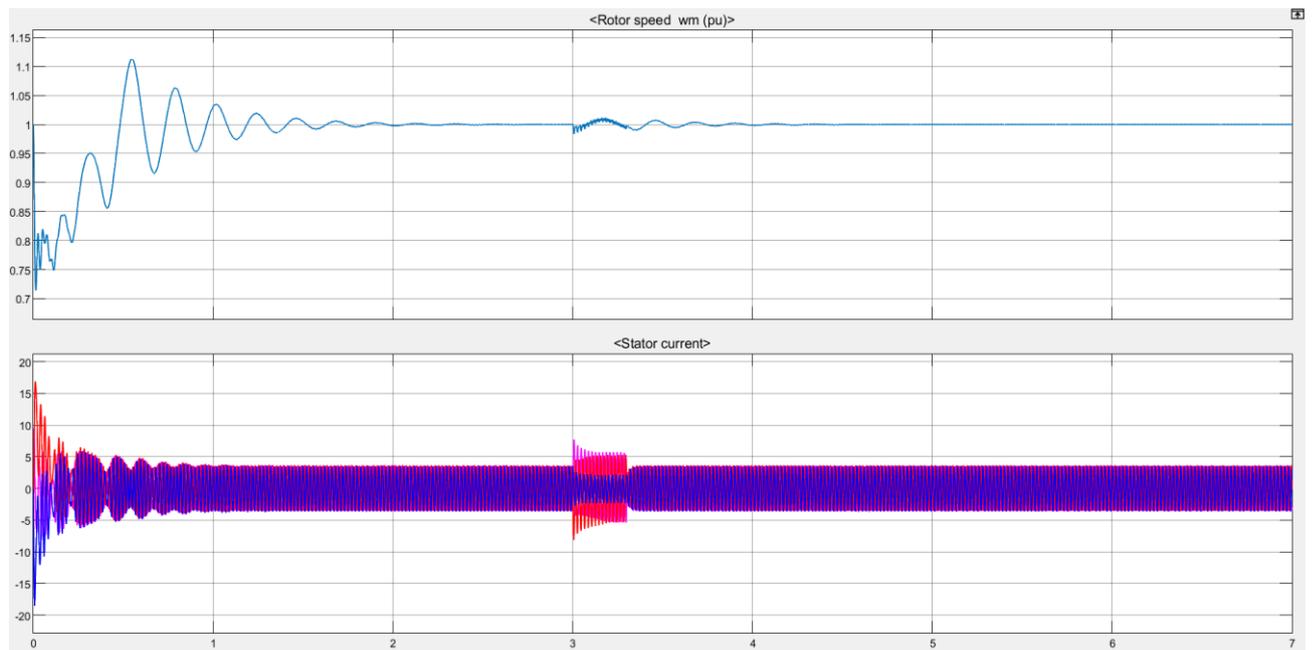


Рисунок 4.13 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора при двухфазном коротком замыкании для времени устранения КЗ $T_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ сек}$

На основе анализа результатов, приведённых в таблицах 4.6–4.9, сделаны следующие выводы:

1. Отсутствие системы АРВ:

– При увеличении времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. нарушение устойчивости отсутствует;

- Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;
- Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. пиковое значение тока статора при коротких замыканиях $I_{\text{пик}}$ не изменяется;
- Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;
- Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$.

2. Наличие АРВ по току возбуждения и реактивной мощности:

- При трёхфазном КЗ и наличии АРВ по току возбуждения увеличение времени устранения КЗ выше 0,3 сек. нарушает устойчивость работы СД меньшей мощности. Во всех остальных случаях устойчивость не нарушается;
- Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;
- Увеличение времени устранения КЗ от 0,1 до 0,5 сек. пиковое значение тока статора при коротких замыканиях $I_{\text{пик}}$ не изменяется;
- Увеличение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ от 390 до 1590 МВ·А приводит к увеличению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$;
- Изменение мощности КЗ $S_{\text{КЗ}}$ в выбранных пределах не влияет на пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$;
- Включение АРВ по току возбуждения или реактивной мощности приводит к уменьшению пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$;
- Во всех случаях при трёхфазном КЗ время выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$ превышает время выхода двигателя на номинальный режим работы при двухфазном КЗ;
- Во всех случаях при трёхфазном КЗ пиковое значение тока статора $I_{\text{пик}}$ превышает пиковое значение тока статора при двухфазном КЗ.

Сравнивая результаты, приведённые в таблицах 4.6–4.9 можно сделать вывод, что увеличение мощности СД при наличии АРВ приводит к повышению

устойчивости самозапуска СД и уменьшению времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$.

Сравнение пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ и времени выхода двигателя на номинальный режим работы $T_{\text{восст}}$ показывает, что переход с напряжения 35 кВ на 110 кВ при одинаковой мощности электродвигателя приводит к незначительному (5–8%) увеличению $I_{\text{пик}}$ и $T_{\text{восст}}$.

Сравнение результатов машинных экспериментов при напряжении 35 кВ и 110 кВ показывает, что устойчивость в режиме самозапуска при переходе от одного уровня напряжения к другому не меняется.

4.2.4. Зависимости самозапуска СД при коротких замыканиях и напряжении внешнего электроснабжения 110 кВ

Аналогично параграфу 4.2.2, на основании результатов, приведённых в таблицах 4.6–4.9, получены зависимости и значения R^2 для СДВ-15-39-10 и СДВ-16-64-12 (таблица 4.10) при помощи программного пакета STATISTICA.

На основе полученных зависимостей (таблица 4.10) построены графики времени восстановления нормального режима работы $T_{\text{восст}}$ (рисунки 4.14 и 4.15), и пикового значения тока статора $I_{\text{пик}}$ от времени устранения КЗ $T_{\text{ном}}$ (рисунки 4.16 и 4.17).

Влияние мощности КЗ на время восстановления нормального режима работы и пиковое значение тока статора СД не учитывается.

Таблица 4.10.

35кВ 3ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R^2	СДВ-16-64-12	R^2
АП	$T_{\text{восст}} = 3,88 + 2,7 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95	$T_{\text{восст}} = 3,75 + 2,47 \cdot T_{\text{ном}}$	0,91
РТВ	-	-	$T_{\text{восст}} = 3,79 + 1,75 \cdot T_{\text{ном}}$	0,97
РРМ	$T_{\text{восст}} = 4,09 + 2,5 \cdot T_{\text{ном}}$	0,988	$T_{\text{восст}} = 1,76 + 2,8 \cdot T_{\text{ном}}$	0,91
35кВ 2ф. КЗ	СДВ-15-39-10	R^2	СДВ-16-64-12	R^2
АП	$T_{\text{восст}} = 2,88 + 1,45 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95	$T_{\text{восст}} = 1,43 + 1,75 \cdot T_{\text{ном}}$	0,96
РТВ	$T_{\text{восст}} = 1,38 + 5,25 \cdot T_{\text{ном}}$	0,95	$T_{\text{восст}} = 1,66 + 1,56 \cdot T_{\text{ном}}$	0,93
РРМ	$T_{\text{восст}} = 1,83 + 2,9 \cdot T_{\text{ном}}$	0,89	$T_{\text{восст}} = 1,29 + 3,6 \cdot T_{\text{ном}}$	0,96

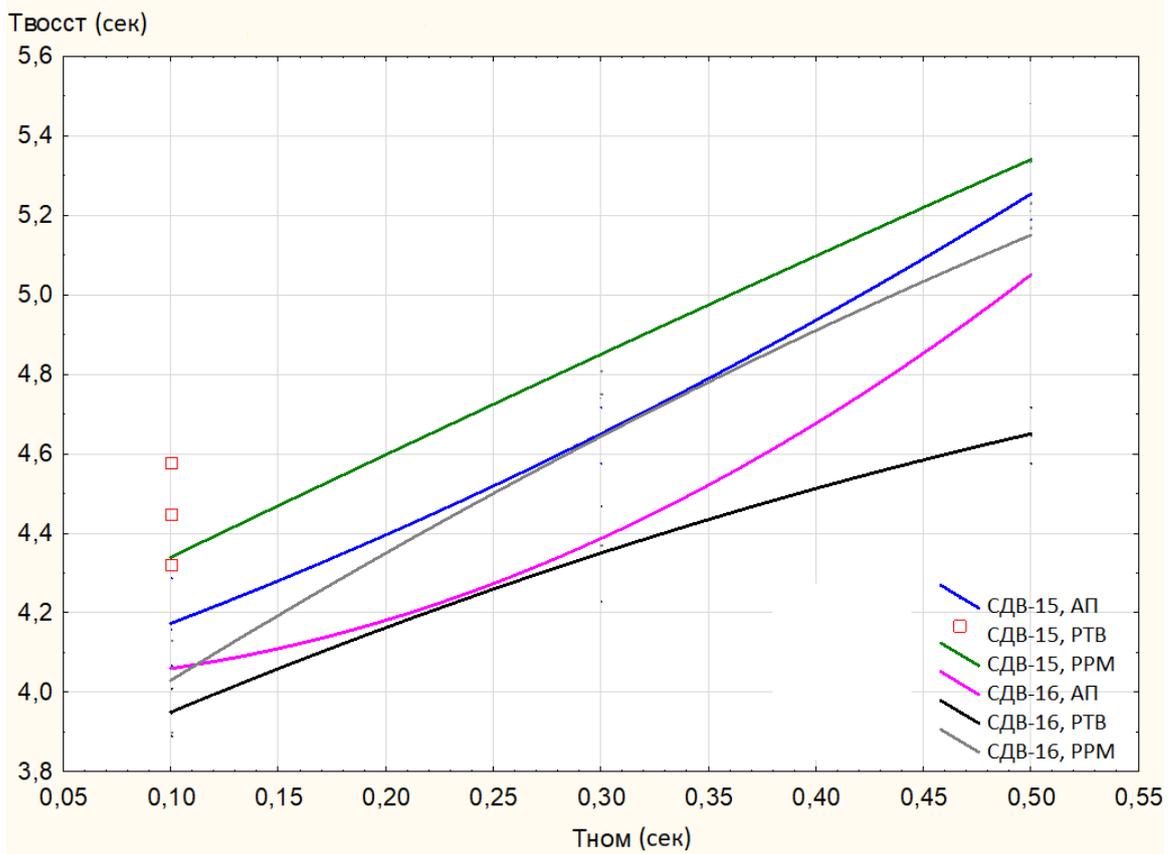


Рисунок 4.14 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени устранения трехфазного КЗ

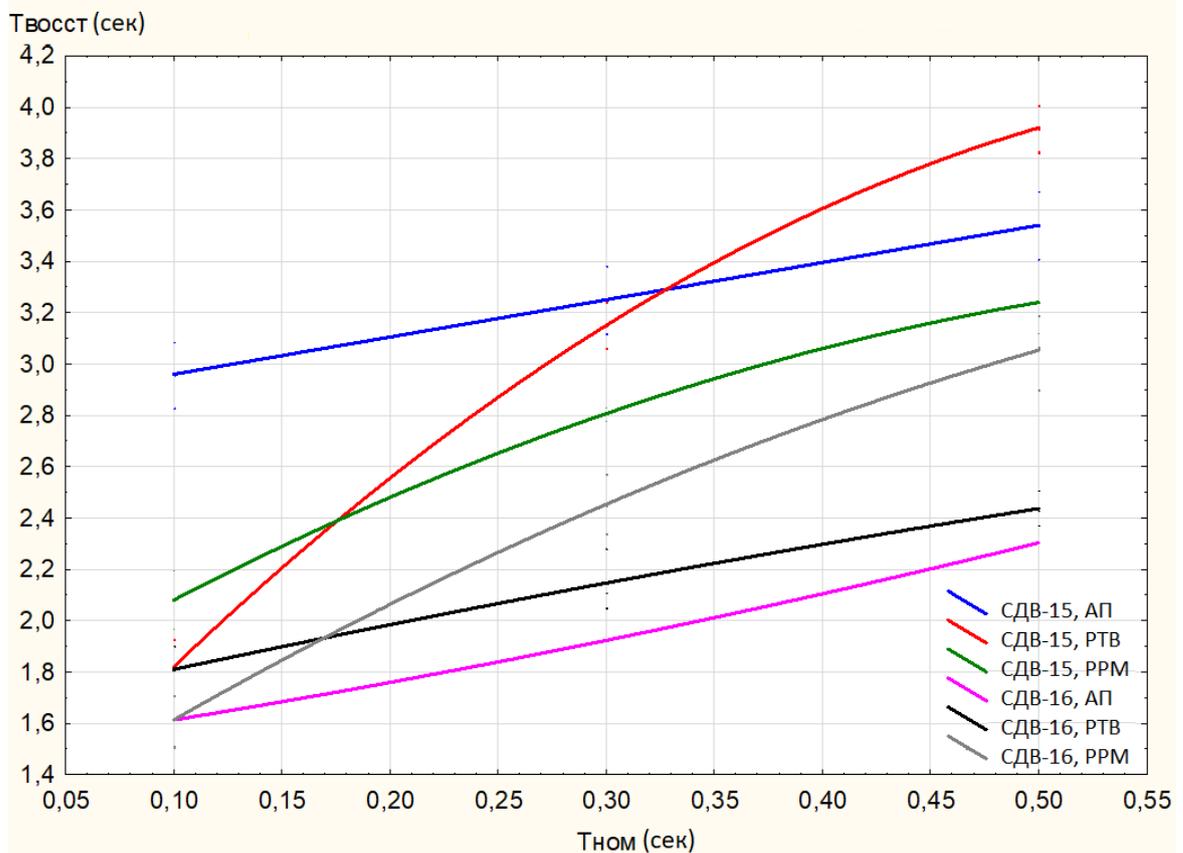


Рисунок 4.15 – Графики зависимостей времени восстановления нормального режима работы от времени устранения двухфазного КЗ

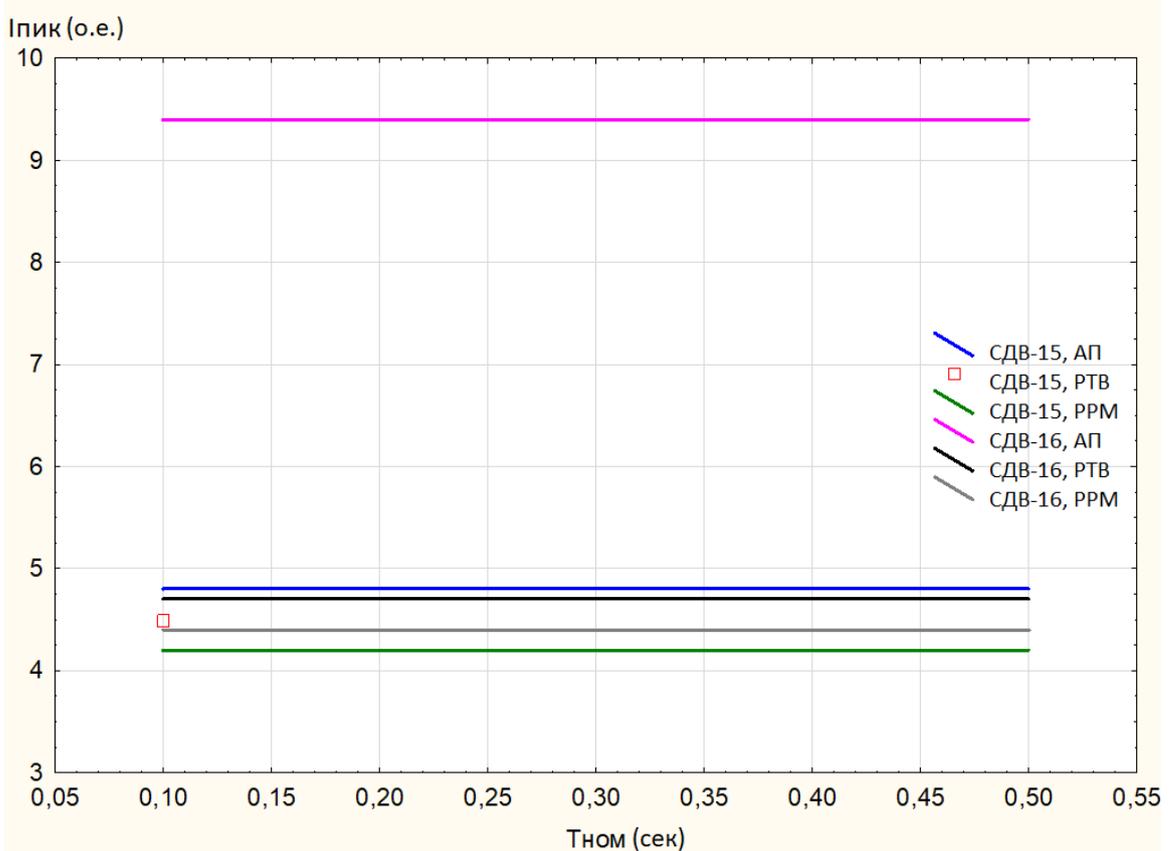


Рисунок 4.16 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени устранения трехфазного КЗ

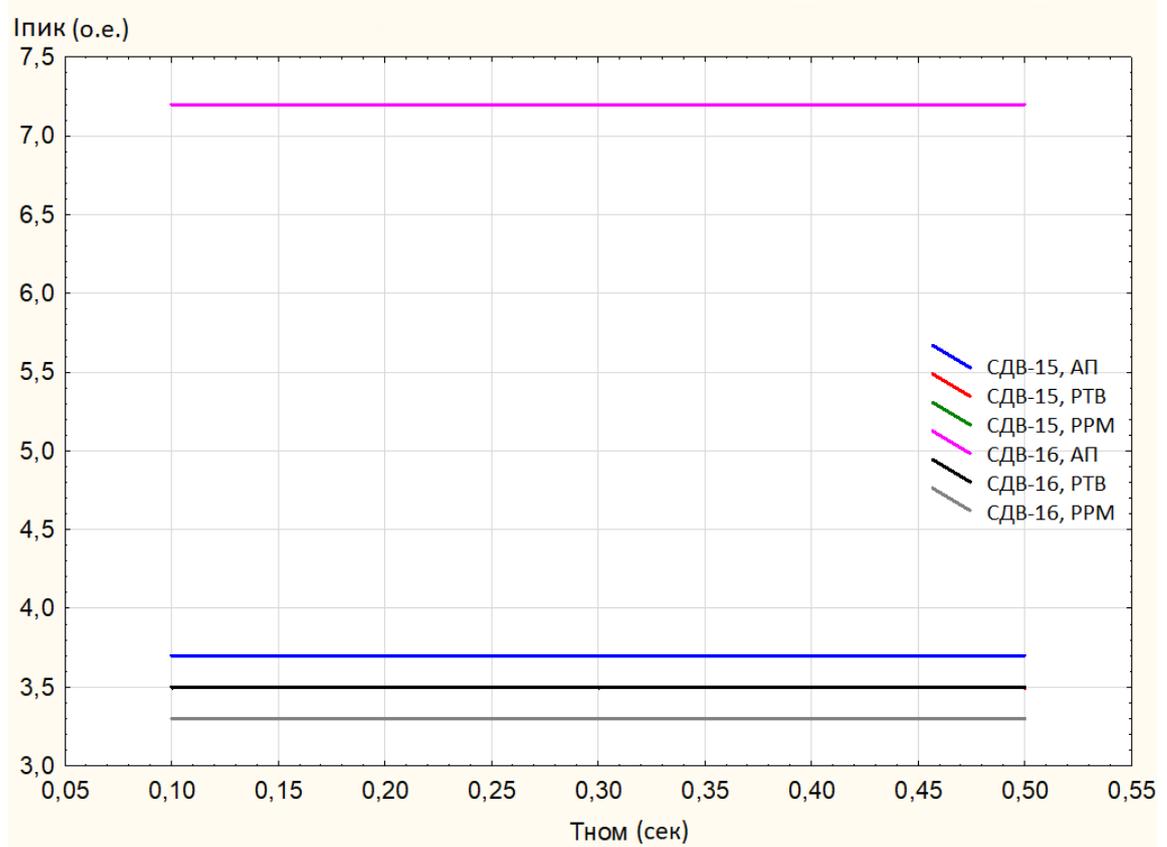


Рисунок 4.17 – Графики зависимостей пиковых значений тока статора от времени устранения двухфазного КЗ

На основании анализа зависимостей, приведённых в таблице 4.10, и графических зависимостей рисунков 4.14–4.17, можно сделать выводы, которые аналогичны сформулированным в разделе 4.2.3:

- независимо от мощности СД и отсутствии АРВ нарушение устойчивости самозапуска отсутствует. Однако время восстановления $T_{\text{восст}}$ с увеличением мощности СД и переходу от трёхфазного к двухфазному КЗ уменьшается;

- для двигателя меньшей мощности при трёхфазном КЗ и включении АРВ по току возбуждения, увеличение времени $T_{\text{ном}}$ больше 0,11 сек. происходит с нарушением устойчивости самозапуска;

- при увеличении мощности СД, включении АРВ и увеличении времени $T_{\text{ном}}$ нарушения устойчивости самозапуска не возникает. При этом время $T_{\text{восст}}$ при увеличении мощности СД уменьшается по сравнению со случаем отсутствия АРВ;

- максимальные значения тока статора практически не зависят от времени $T_{\text{ном}}$, однако они зависят от параметров двигателей, применяемых систем АРВ и вида КЗ;

- максимальное значение тока статора существенно возрастает при любом виде КЗ в случае асинхронного пуска СД большей мощности и отсутствии АРВ;

- при любом АРВ и виде КЗ для двигателя меньшей мощности время восстановления номинального режима работы в несколько раз больше времени для электродвигателя большей мощности.

Зависимости, приведённые в таблице 4.10 и графики на рисунках 4.14–4.17 позволяют определить допустимые времена срабатывания релейной защиты, при которых будет иметь место устойчивый режим самозапуска СД при отсутствии или наличии АРВ и одновременной работе нескольких СД различной мощности для напряжения СЭС 110 кВ.

4.3. Способ снижения тока статора двигателя при коротком замыкании

Анализ вышеуказанных экспериментов подтверждает, что ток статора возрастает с увеличением времени устранения КЗ. При КЗ на шинах растёт остаточная ЭДС и при этом ток, протекающий при самозапуске СД, может

превышать пусковой ток в несколько раз. При этом наличие АРВ приводит к дополнительному увеличению пикового значения тока статора.

В разделе 3.3 предложен способ решения, который заключается в том, что в случае кратковременного перерыва питания, регулятор по току возбуждения отключается до устранения КЗ. Рассмотрим случай для двигателя *СДВ-15-39-10* с регулированием по току возбуждения и продолжительностью КЗ равным 0,1 секунды. При коротком замыкании происходит срабатывание реле *Switch1* (рисунок 3.12), который в свою очередь обесточивает регулятор возбуждения W_{P1} . После перевода всей нагрузки на другой ввод и появлении на шинах двигателя напряжения, реле *Switch2* подает ток возбуждения в обмотку двигателя и СД выходит на номинальный режим работы.

Сравнение величин максимального тока при включенной и отключенной системе АРВ показывает, что ток статора в данных экспериментах возрастает примерно до 4,7 отн.ед. (рисунок 4.2) и 4,05 отн.ед. (рисунок 4.18) соответственно.

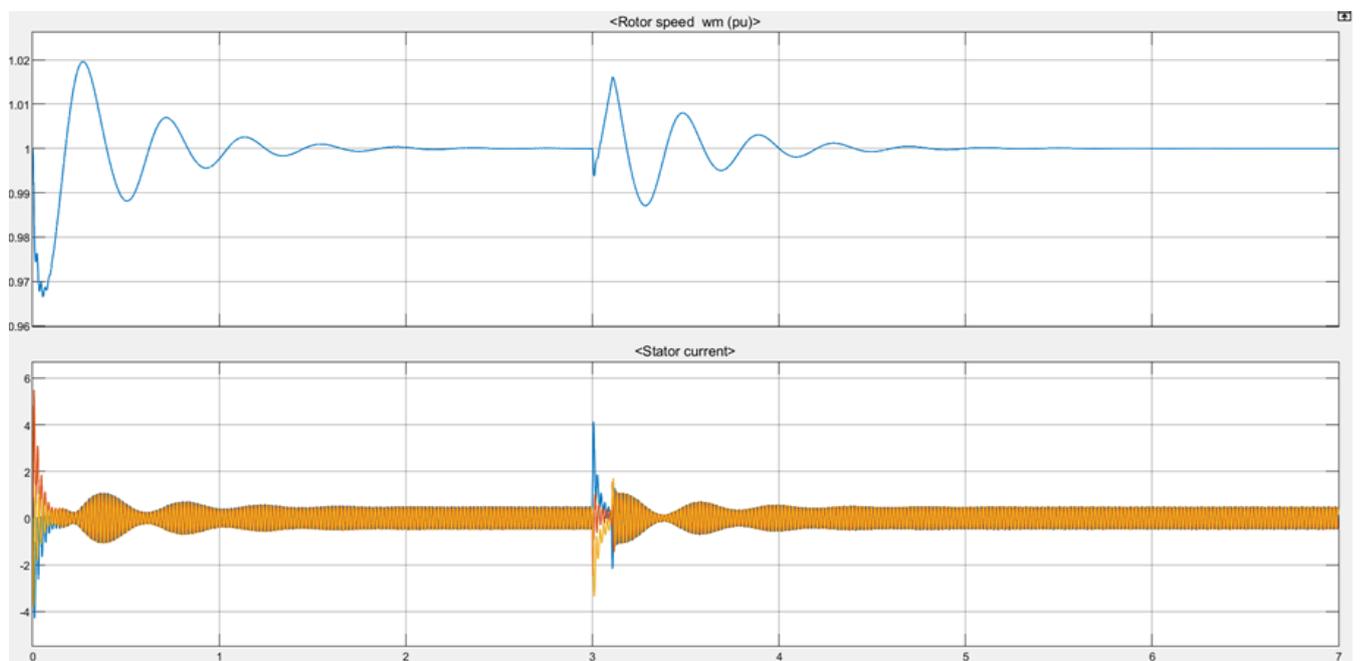


Рисунок 4.18 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае отключения АРВ

Следовательно предлагаемый способ позволяет снизить ток статора в среднем на 13%. Однако в этом случае увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы с использованием контура регулятора по току возбуждения, в среднем на 7%.

4.4. Способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей посредством форсировки возбуждения

Сохранение устойчивой работы СД в режиме самозапуска возможно посредством увеличения величины тока возбуждения в определенных пределах согласно ГОСТ 24688–81.

Рассмотрим неустойчивый режим для двигателя *СДВ-15-39-10* с регулированием по току возбуждения и временем устранения КЗ 0,3 сек (рис. 4.3).

Аналогично предложенной в разделе 3.4 рекомендации по сохранению устойчивой работы СД посредством форсировки возбуждения, увеличим при коротком замыкании ток возбуждения до 1,7 отн. ед. После устранения короткого замыкания и появлении на шинах двигателя напряжения, через выдержку времени, в обмотку возбуждения двигателя подается номинальный ток и СД выходит на номинальный режим работы, не теряя устойчивости (рисунок 4.19).

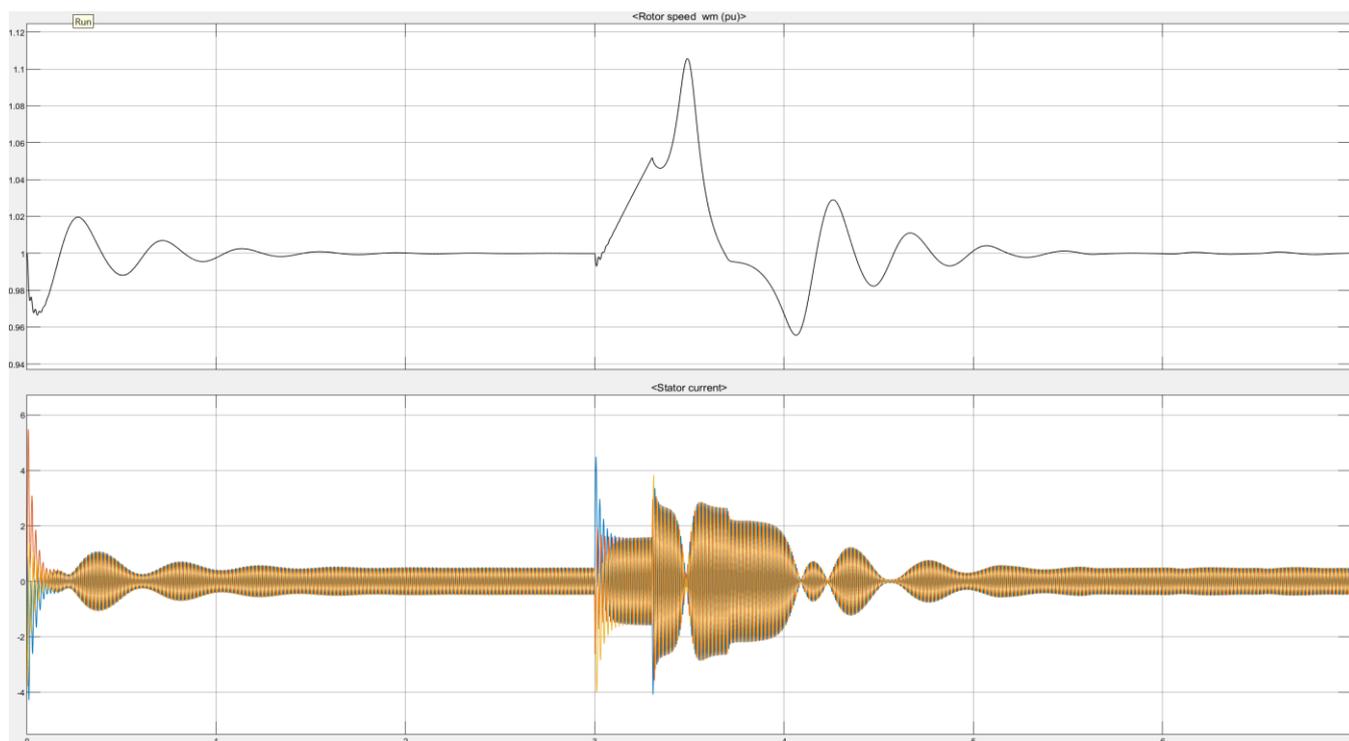


Рисунок 4.19 – Графики изменения частоты вращения ротора и тока статора в случае форсировки возбуждения

Сравнения графиков переходных процессов на рисунках 4.3 и 4.19 позволяют сделать вывод, что сохранение устойчивой работы СД в режиме самозапуска возможно посредством форсировки возбуждения до 1,7 отн.ед. для АРВ по току возбуждения.

4.5. Рекомендации по обеспечению самозапуска синхронных электродвигателей при коротких замыканиях

В таблицах 4.11 и 4.12 обобщены основные результаты исследований самозапуска синхронных двигателей в системе электроснабжения в случае трехфазных и двухфазных коротких замыканий.

Таблица 4.11.

Тип аварий			Параметры синхронных двигателей			
			Мощность < 2 МВ·А		Мощность > 2 МВ·А	
			Применение АРВ	Пиковые токи статора	Применение АРВ	Пиковые токи статора
Короткие замыкания	3ф. КЗ	Увеличение времени устранения КЗ	Для АРВ по току возбуждения не должно превышать 0,1 сек.	Не влияет на пиковые значения тока статора	Не нарушается устойчивость СД	Не влияет на пиковые значения тока статора
		Увеличение мощности КЗ	Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 4–5% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора	Время восстановления нормального режима работы СД уменьшается на 5–6% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора		
		Номинальное напряжение внешней СЭС	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 3%	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 5%		
		АРВ с отключаемым регулятором по току возбуждения	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 7%, а пиковый ток статора уменьшается на 13%	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 8%, а пиковый ток статора уменьшается на 15%		

Таблица 4.12.

Тип аварий			Параметры синхронных двигателей			
			Мощность < 2 МВ·А		Мощность > 2 МВ·А	
			Применение АРВ	Пиковые токи статора	Применение АРВ	Пиковые токи статора
Короткие замыкания	2ф. КЗ	Увеличение времени устранения КЗ	Для АРВ по току возбуждения не должно превышать 0,1 сек.	Не влияет на пиковые значения тока статора	Не нарушается устойчивость СД	Не влияет на пиковые значения тока статора
		Увеличение мощности КЗ	Время восстановления нормального режима работы	Время восстановления нормального режима работы		

		СД уменьшается на 4–5% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора	СД уменьшается на 5–6% для всех типов АРВ, и не влияет на пиковые токи статора
	Номинальное напряжение внешней СЭС	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 3%	С увеличением напряжения до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 5% для всех типов АРВ, а пиковый ток статора уменьшается на 4%
	АРВ с отключаемым регулятором по току возбуждения	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 7%, а пиковый ток статора уменьшается на 13%	Время восстановления нормального режима работы СД увеличивается на 8%, а пиковый ток статора уменьшается на 15%

Результаты, приведённые в таблицах 4.11 и 4.12 позволяют оценить влияние структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, системы АРВ при одновременной работе нескольких СД разной мощности на протекание переходных процессов самозапуска синхронных двигателей при коротких замыканиях:

1. Для всех типов АРВ, с увеличением мощности КЗ от 390 до 1590 МВ·А, время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5%.

Влияние мощности КЗ на пиковые значения тока статора не установлено.

2. При наличии одноконтурного АРВ, с увеличением времени перерыва питания до 0,3 сек. оба двигателя работают устойчиво. Однако двигатель большей мощности показывает меньшее время восстановления номинального режима работы и меньшие пиковые значения токов статора в 2 раза по сравнению с двигателем меньшей мощности.

При наличии одноконтурного АРВ в сравнении с его отсутствием пиковые значения тока статора снижаются в 2 раза для обоих двигателей.

С увеличением времени устранения КЗ более 0,3 сек. при трехфазных КЗ и наличии одноконтурного АРВ нарушается устойчивость работы двигателя меньшей мощности.

3. При наличии двухконтурного АРВ, с увеличением времени устранения КЗ до 0,5 сек., время выхода двигателя меньшей мощности на номинальный режим работы возрастает на 29% для трехфазных, и на 31% для двухфазных КЗ, тогда как двигатель большей мощности на 15% и 16% соответственно.

Пиковые значения тока статора снижаются на 10% для обоих двигателей при наличии двухконтурной АРВ в сравнении с одноконтурным.

4. В случае трехфазного КЗ время восстановления нормального режима работы двигателя меньшей мощности возрастает, в среднем в 2 раза, по сравнению со случаем кратковременного перерыва питания.

5. Применение двухконтурного АРВ требует большее время, по сравнению с применением одноконтурного АРВ, необходимое СД для восстановления нормального режима работы, в среднем на 5%.

6. С увеличением величины номинального напряжения с 35 кВ до 110 кВ время восстановления нормального режима работы СД увеличивается в среднем на 5%, для всех типов АРВ, тогда как пиковый ток статора уменьшается в среднем на 3%.

На основании полученных результатов были сформулированы следующие выводы и рекомендации по параметрам самозапуска СД в системе электроснабжения при коротких замыканиях:

1. На устойчивость самозапуска синхронного электродвигателя влияют следующие факторы:

- полная мощность СД $S_{сд}$;
- время устранения КЗ: $T_{ном}$;
- структура системы АРВ синхронного электродвигателя.
- напряжение питания СЭС $U_{ном}$;
- мощность КЗ системы электроснабжения $S_{кз}$.

2. Обеспечить устойчивую работу синхронного электродвигателя возможно следующими способами:

- изменить настройки релейной защиты с целью уменьшения времени устранения КЗ $T_{ном}$ до 0,3 секунд или менее;

– выполнить форсировку возбуждения СД до устранения КЗ.

3. Обеспечить снижение тока статора СД возможно отключением АРВ синхронного двигателя до устранения КЗ.

4.6. Выводы по четвертой главе

1. Разработана модель схемы электроснабжения предприятия, учитывающая трёхфазные и двухфазные короткие замыкания.

2. Определено влияние структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, системы АРВ при одновременной работе нескольких СД разной мощности на протекание переходных процессов самозапуска синхронных двигателей в случае трёхфазных и двухфазных коротких замыканий.

3. Получены зависимости, характеризующие особенности самозапуска СД в случае трёхфазных и двухфазных коротких замыканий на основе учёта структуры и параметров системы электроснабжения, времени срабатывания релейной защиты, одновременной работы нескольких синхронных электродвигателей разной мощности, системы автоматического регулирования возбуждения, которые позволяют определить комплекс мероприятий, обеспечивающие самозапуск СД.

4. Предложен способ снижения тока статора синхронных двигателей в режиме самозапуска, основанная на отключении контура регулирования тока возбуждения. Предлагаемый способ позволяет снизить ток статора в среднем на 13%. Однако в этом случае увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы, в среднем на 7% в зависимости от типа АРВ.

5. Предложен способ обеспечения самозапуска синхронных электродвигателей в случае коротких замыканий посредством форсировки тока возбуждения синхронного электродвигателя.

6. На основании выполненных исследований обоснованы параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих в случае трёхфазных или двухфазных коротких замыканий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи обоснования параметров самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при кратковременном перерыве питания или коротком замыкании, что имеет существенное значение для устранения негативных последствий при возникновении аварийных ситуаций в электротехнических комплексах и системах, содержащих синхронные электродвигатели.

В соответствии с поставленной целью и задачами получены следующие результаты:

1. Разработаны компьютерные модели для исследования переходных процессов самозапуска синхронного электродвигателя, учитывающие структуру и параметры системы электроснабжения, время срабатывания релейной защиты, электромагнитные процессы в синхронном электродвигателе, систему автоматического регулирования возбуждения и одновременную работу нескольких электродвигателей.

2. Определены зависимости времени восстановления нормального режима работы и пикового значения тока статора синхронного электродвигателя от времени восстановления напряжения, характеризующие особенности самозапуска вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в системе электроснабжения.

3. Обоснованы параметры самозапуска синхронного электродвигателя в промышленных электрических сетях при аварийных ситуациях, возникающих вследствие кратковременного перерыва питания или короткого замыкания. Показано влияние на процесс самозапуска СД следующих параметров: напряжение питания и мощность КЗ системы электроснабжения, полная мощность СД, время восстановления напряжения, структура системы автоматического регулирования возбуждением СД.

4. Предложен способ снижения тока статора синхронных двигателей во время самозапуска, основанный на отключении контура регулирования тока возбуждения. Предлагаемый способ позволяет снизить ток в среднем на 15–35%. Однако в этом случае увеличивается время выхода СД на номинальный режим работы, в среднем на 10–20% в зависимости от типа АРВ.

5. Предложен способ обеспечения самозапуска синхронных двигателей в случае кратковременного перерыва питания или короткого замыкания в системе электроснабжения посредством форсировки возбуждения синхронного электродвигателя. Данный способ позволяет реализовать самозапуск при увеличении времени срабатывания релейной защиты до 0,3–0,5 секунд.

6. Результаты диссертационной работы рекомендуются для использования электротехническими компаниями, работающими в области электрификации промышленных предприятий и разработки электроприводов с синхронными электродвигателями, что позволит предотвратить выпадение двигателей из синхронизма и избежать возникновения аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jignesh Parmar. Importance of Reactive Power of System, – OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2011.
2. Пивняк Г. Г., Винославский В.Н., Рыбалко А. Я., Несен Л. И. Переходные процессы в системах электроснабжения. Учебник для вузов. – Киев: «Выща школа», 2003. – 391–394 с.
3. Эрнст А. Д. Самозапуск асинхронных двигателей. Учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 11–12 с.
4. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 204–205 с.
5. Лопато Д. С. Общая характеристика самозапуска. – М.: Изд-во национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2015.
6. Ершов А. В. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Курс лекций. – Красноярск, 2012. – 91 с.
7. Эрнст А. Д. Самозапуск синхронных двигателей. Учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – 65 с.
8. Михалев С. В. Математическая модель для оценки устойчивости синхронных электродвигателей при кратковременной потере питания. Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 июля 2013г.: в 5 частях, Часть 3. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука- Общество», 2013. – 99–103 с.
9. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007. – С. 11–34.
10. Пупин В. М. Анализ провалов напряжения в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 35–41.
11. Пупин В. М. Исследование режимов пуска и самозапуска электродвигательной нагрузки с целью обеспечения непрерывности технологических процессов. Промышленная энергетика. – 2006. – № 7. – С. 27–33.

12. Михалев С. В. Система поддержания устойчивости работы синхронных электродвигателей 6–10 кВ. Автореферат канд. дисс. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 18 с.

13. Лащенов М. Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электроснабжения. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 1. – С. 134–140.

14. Лащенов М. Б., Шевырев Ю. В. Исследование работы синхронного двигателя при кратковременной потере питания для условий горных предприятий. Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2020. – № 1. – С. 116–122.

15. Жеребцов А. Л. Повышение устойчивости работы синхронных двигателей 6(10) кВ ГПА изменением способа управления тока возбуждения в послеаварийных режимах. Материалы заседания секции «Энергетика» НТС ПАО «Газпром». – 2018. Ч.2. – С. 27–32.

16. Степанов С. Е., Крюков О. В. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях. Газовая промышленность. – 2014. – № 8. – С. 50–56.

17. Черных И. А., Шилов И. Г., Повышение устойчивости работы электродвигателей при провалах напряжения. Электрика. – 2006. – № 2. – С. 36–38.

18. Пупин В. М., Егорова М. С. Электроснабжение Оскольского электрометаллургического комбината и повышение надежности электрообеспечения основных потребителей. Электрика. – 2008. – № 3. – С. 21–32.

19. Кочетков В. В., Котенев В. И., Елькин Д. А. Математическая модель синхронного двигателя в электрической сети с нестабильным напряжением. Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 105–106.

20. Гусев А. С. Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин. Известия Томского политехнического университета. – 2005. – № 7. – С. 206–210.

21. Лоханин Е. К. Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем. Сборник докладов III

международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – 2008. – С. 257–262.

22. Ковалев П. А. О мерах, принятых обществом «Гелиос» для обеспечения непрерывной доставки электрической энергии абонентам общества в С.-Петербурге. «Труды I Всероссийского электротехнического съезда», 1901, т. 3.

23. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. М. – Л., Госэнергоиздат, 1950.

24. Зейлидзон Е. Д. Противоаварийная автоматика в энергосистемах СССР. «Электричество», 1970, № 3.

25. Stossinger H. Автоматическое управление агрегатами резервного энергоснабжения. ETZ, Heft 11 and 18, 1940.

26. Сыромятников И. А. Восстановление напряжения на собственные расходы при питании от сети. «Электрические станции», 1935, № 2.

27. Сыромятников И. А. Поведение моторов собственного расхода при переходных явлениях. «Электрические станции», 1935, № 10.

28. Сыромятников И. А. Опыт борьбы за сохранение устойчивости работы системы Азэнерго. «Электрические станции», 1941, № 1.

29. Сыромятников И. А. Бесперебойное электроснабжение потребителей. «Электрические станции», 1943, № 5–6.

30. Барзам А. Б. Релейную защиту энергетических систем на уровень стахановских требований. «Электричество», 1937, № 2.

31. Трофимов Р. Ф. Автоматические повторные включения и аварийные переключения питающих линий в применении к шахтным условиям. Автореферат канд. дисс. Томск, ТПИ, 1940.

32. Шапошников К. Я. Автоматическое повторное включение фидеров угольной и машиностроительной промышленности, как мероприятие, повышающее надежность электроснабжения. Автореферат канд. дисс. Новочеркасский индустриальный ин-т им. Орджоникидзе, 1941.

33. Мосесов Н. С. Самозапуск электродвигателей глубоконасосных установок. «Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности СССР», 1949, № 6.

34. Плющ Б. М., Эскибян М. А., Эльбирт М. Д., Саркисов В. И. Самозапуск электродвигателей станков качалок глубоких насосов на нефтяных промыслах. «Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности СССР», 1949, № 8.

35. Плющ Б. М., Эскибян М. А., Саркисян В. О. Самозапуск электродвигателей при магистральном питании. «Электричество», 1951, № 9.

36. Плющ Б. М., Саркисян В. О. Из опыта эксплуатации магистрального самозапуска электродвигателей станков качалок глубиннонасосных установок. «Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности СССР», 1954, № 12.

37. Портной М. Г., Хомутов Б. А. Испытания электродвигателей собственных нужд на самозапуск. «Электрические станции», 1954, № 11.

38. Каспаров Н. Х. Опыт применения самозапуска ответственных электродвигателей. «Электрические станции», 1954, № 7.

39. Адонц Г. Т. Исследование режимов самозапуска и автоматического повторного пуска под нагрузкой асинхронных двигателей. «Электричество», 1952, № 5.

40. Адонц Г. Т., Алескеров С. А., Попов А. Н., Бабаев М. А. Экспериментальные данные исследования устойчивости узла нагрузки энергосистемы. «Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности СССР», 1952, № 8.

41. Техническое управление МЭС СССР. Противоаварийный циркуляр № Э-8/54. О повышении надежности работы электроустановок потребителей в случаях кратковременных снижений напряжения. «Электрические станции», 1954, № 12.

42. Турышев Б. Ф., Хронусов Г. С. Оценка надежности работы шахтных агрегатов с учетом их самозапуска. Изв. вузов, «Горный журнал», 1970, № 11.

43. Хронусов Г. С. Исследование и разработка способов повышения надежности электроснабжения шахтных вентиляторов, водоотливных и компрессорных установок. Автореферат канд. дисс. Свердловск, СГИ, 1970.

44. Popular Science, т. 168, р. 106, № 4, 1956.

45. Дворак Н. М. Оптимизация управления процессом самозапуска синхронного электропривода поршневых компрессоров химических производств. Автореферат канд. дисс. Кемерово, 1984.
46. Голоднов Ю. М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатом издат, 1985. – 136 с.
47. Носов К. Б., Дворак Н. М. Средства и способы самозапуска электродвигателей. – Кемерово: Кн. изд-во, 1992. – 126 с.
48. Льюис, Марш. Автоматический перевод на резервные шины питания собственных нужд тепловых электрических станций. «Энергетика за рубежом. Собственные нужды электрических станций». М. – Л., Госэнергоиздат, 1958.
49. Phillips C. L. Самозапуск и защита крупных синхронных двигателей. «Application and Industry», 1959, № 45.
50. Павлюк К., Беднарек С. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей. Перевод с польского. М., «Энергия», 1971.
51. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. М. – Л., Госэнергоиздат, 1950.
52. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М. – Л., Изд-во АН СССР, 1962.
53. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л., «Энергия», 1973.
54. Важнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М. – Л., Госэнергоиздат, 1960.
55. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока методом симметричных составляющих. Перевод с англ. М. – Л., Госэнергоиздат, 1958.
56. Конкордиа Ч. Синхронные машины. Переходные и установившиеся процессы. Перевод с англ. М. – Л., Госэнергоиздат, 1959.
57. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Перевод с нем. М. – Л., Госэнергоиздат, 1963.

58. Aguilar D. , Vazquez G., Rolan A., Rocabert J., Corcoles F. Simulation of Wound Rotor Synchronous Machine under Voltage Sag. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2010. – pp. 2626 – 2631
59. Astrom, Karl J. Advanced PID Control. – USA: ISA. – 2006. – pp. 446
60. IEEE Std 421.5-2005. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. – New-York:IEEE. – 2006. – pp. 85
61. Babescu M., Prostean O., Prostean G., Szeidert I., Vasar C. Using Phase Portraits. 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems. – 2007
62. Fan B., Z. Yang, W. Wei Xu, X. Wang. Rotor Resistance Online Identification of Vector Controlled Induction Motor Based on Neural Network. Mathematical Problems in Engineering. – 2014
63. Boglietto A., Cavagino A., Ferrari L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2008. – vol. 23. – pp. 796-803
64. Kiusalaas J. Numerical Methods in Engineering with Python. Cambridge University Press. New York. – 2010. – pp. 434
65. ANSI/IEEE Std 1547-2003 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. – 2004
66. Brown R. E., Hanson A. P., Willis H. L. Assessing the reliability of distribution networks. IEEE Computer Applications in Power Magazine. – 2001. – vol. 1. – pp. 44-49
67. Charles J. Automatic High-Speed Transfer of Power Plant Auxiliary System Load - Theory and Application. Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa. – 2005. – pp. 332-336
68. Jantke K., Krumm R., Vieille R. High Speed Transfer System for optimized supply of energy. Elektrotechnik + Automation. – 2001. – vol. 22. – pp. 1-2
69. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2002.
70. ПБ 05-356-00. Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом- М.: ПО ОБТ, 2001.
71. Щуцкий В. И., Сидоров А. И., Ситчихин Ю. В. Электробезопасность на открытых горных работах. – М.: Недра, 1996.

72. Пичуев А. В., Щуцкий В. И. Управление электробезопасностью на открытых горных работах. «Электробезопасность», № 4, 1998.
73. Беляев А. В. Автоматика и защита на подстанциях с синхронными и частотно-регулируемыми электродвигателями большой мощности. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2012.
74. Михалев С. В. Релейная защита электродвигателей напряжением 6–10 кВ терминалами БМРЗ. Методика расчета. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2013.
75. НТЦ «Механотроника». Стандарт организации СТО ДИВГ-046-2012. Терминалы релейной защиты синхронных и асинхронных электродвигателей 6–10кВ. Расчет уставок. Методические указания. – Санкт-Петербург, 2012. – 90 с.
76. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л. Энергия, 1980.
77. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.
78. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950. – 552 с.
79. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М. – Л., Госэнергоиздат, 1963.
80. Слодарж М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. – М.: «Энергия», 1977. – 215 с.
81. Чернышев А. Ю., Дементьев Ю. Н., Чернышев И. А. Электропривод переменного тока. Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
82. ГОСТ 13109–97 Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 1999. – 64 с.
83. Лоханин Е. К. Моделирование синхронных машин. Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 240–244.

84. Забелло Е. Применение прикладных программ в расчете режимов и устойчивости работы собственных генерирующих источников при их параллельной работе с энергосистемой. Научно-производственный журнал «Энергетика и ТЭК». – 2011 № 9,10. – С. 20–22.
85. Беляева Е. Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 137 с.
86. Голубев, М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4–35 кВ. – М.: Энергия, 1980. – 90 с.
87. Абрамович Б. Н. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 70 с.
88. Гусев А. С. Всережимная математическая модель линий электропередачи. Известия Томского политехнического университета. – 2005. – № 7. – С. 206–210.
89. Костелянец В. С. Режимы и надежность работы тиристорного возбудителя синхронной машины. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
90. Лоханин Е. К. Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем. Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конференция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 257–262.
91. Петелин Д. П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1961.
92. Техническое описание и инструкция по эксплуатации возбудительных устройств серии БВУ. ИВЖ 579.047 Т.О. – 1980 г. – 41 с.
93. Цифровое возбудительное устройство синхронных двигателей ВТЦ-СД-Б. Руководство по эксплуатации 0511.100.100 РЭ. – Самара: ОАО «НИПОМ», 2002. – 33 с.
94. Котенев В. И., Кочетков В. В. Обобщенная функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения изменением реактивной мощности синхронного двигателя и

статических компенсирующих устройств. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки, Ч. 4 (44) –2014. – С. 122–129.

95. Кочетков В. В., Шишков А. Г. Комплексная система автоматического управления параметрами узла нагрузки системы электроснабжения. X Международная молодежная научная конференция "Тинчуринские чтения", т. 1 – Казань, 2015. – С. 87–88.

96. Пичуев А. В., Карпенко С. М. Способы и средства обеспечения электробезопасности на горных предприятиях. – Москва: МИЭЭ, 2019. – 136 с.

97. Плащанский Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий. – Москва: Изд-во МГГУ, 2006. – 11 с.

98. Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ). Главгосэнергонадзор России. – Москва: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – 14 с.

99. Ершов М. С. Надежность электроснабжения компрессорных станций. – Москва: Нефть и газ, 1995.

100. Гончаров А. Ф. Исследование режимов и применение самозапуска синхронных двигателей карьерных экскаваторов. Автореферат канд. Дисс. – Москва, 1975.

101. Сидоров А. И., Петуров В. И., Пичуев А. В., Суворов И. Ф. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения. – Чита: РИК ЧитГУ, 2009. – 268 с.

102. Пичуев А. В. Проблемы аварийности в карьерных распределительных сетях напряжением 6–10 кВ. «Горный информационно-аналитический бюллетень», №9. – Москва, 2006. – 5 с.

103. Пичуев А. В. Динамика аварийных отключений в карьерных распределительных сетях железорудных предприятий. «Горный информационно-аналитический бюллетень», №7. – Москва, 2006.

104. Пичуев А. В. Динамика аварийных отключений в карьерных распределительных сетях алмазодобывающих предприятий. «Горный информационно-аналитический бюллетень», №8. – Москва, 2006.

105. Пичуев А. В. Статистический анализ причин аварийных отключений в карьерных распределительных сетях алмазодобывающих предприятий. «Горный информационно-аналитический бюллетень» №3. – Москва, 2007.

106. Бухтояров В. Ф. Централизованная защита от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю. Промышленная энергетика, №11. – 1976, – С. 38–41.

107. Васюра Ю. Ф. Квазистационарные перенапряжения в сетях с изолированной, резонансно и эффективно заземленной нейтралью: учебное пособие. – Киров: ФГБОУ ВО «ВятГУ», 2016. – 83 с.

108. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 218 с.

109. Копылов И. П., Мамедов Ф. А., Беспалов В. А. Математическое моделирование асинхронных машин. – М.: Энергия, 1969.

110. Чабан В. И. Дифференциальные уравнения насыщенной неявнополюсной машины в физических координатах машин. Изв.вузов. Электромеханика, №4. – 1977. – С. 20-23.

111. Чабан В. И. Дифференциальные уравнения неявнополюсной машины в косоугольных координатах. Электричество. №3. – 1977. – С. 16–19.

112. Чабан В. И. К расчету переходных процессов в демпферных контурах электрических машин. Электричество, №6. – 1978. – С. 39–41.

113. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – С. 420.

114. ГОСТ 24688–81. Возбудители статические полупроводниковые для трехфазных синхронных двигателей. Общие технические требования (с Изменениями №1,2,3).

Генеральный директор
ООО «Электротехническая промышленная компания»,
действительный член Академии электротехнических наук



Б. И. Абрамов

04 мая 2023 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
ЛАЩЕНОВА Михаила Борисовича на тему
«ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ САМОЗАПУСКА СИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЯХ»,

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по
специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

В научно-технических разработках ООО "Электротехническая промышленная компания" при проектировании новых поколений электротехнических комплексов горных машин и установок с синхронным электроприводом внедрены и используются следующие результаты диссертационной работы Лащенко М. Б.

1. Методика определения параметров самозапуска синхронного электродвигателя при кратковременной потере питания.
2. Методика определения параметров самозапуска синхронного электродвигателя при трёхфазном коротком замыкании.
3. Методика определения параметров самозапуска синхронного электродвигателя при двухфазном коротком замыкании.
4. Имитационные модели для нахождения параметров самозапуска синхронного электродвигателя.

При помощи предложенных программных средств и методик на стадии опытно-конструкторских работ осуществляется выбор параметров самозапуска синхронного электродвигателя, обеспечивающих его самозапуск при кратковременных потерях питания или коротких замыканиях, что позволяет исключить незапланированное отключение синхронных электродвигателей, и тем самым избежать материального ущерба, риска для жизни и здоровья людей.

Зам. генерального директора
по развитию бизнеса, кандидат техн. наук

A blue ink signature, likely belonging to Ivanov A.G., written in a cursive style.

Иванов А.Г.